

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Návrh geometrie VBD pro soustružení materiálu skupiny S
Draft Geometry Inserts for Turning Materials Group S

Student: Bc. Jan Schiffner, DiS.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.

Ostrava 2014

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Schiffner, DiS.**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Návrh geometrie VBD pro soustružení materiálu skupiny S**
Draft Geometry Inserts for Turning Materials Group S

Zásady pro vypracování:

1. Obecná charakteristika daného problému.
2. Závislost trvanlivosti VBD na její geometrii a řezných podmínkách.
3. Návrh metodiky experimentálních prací.
4. Vyhodnocení provedených testů VBD s návrhem optimální geometrie.
5. Technicko-ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábění*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [2] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [3] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Brno : MM Publishing Praha, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [4] MRKVICA, M. *Přípravky a obráběcí nástroje: I. díl, Řezné nástroje*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava. 2006. ISBN 80-7078-941-7.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.**

Konzultant diplomové práce: Ing. Jiří Jeník

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014



Jana Petrů

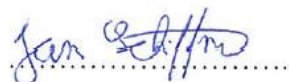
Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 19.5.2014

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Jan Schiffner', written over a horizontal dotted line.

podpis

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 19.5.2014


Adresa trvalého pobytu autora práce:

Bc. Jan Schiffner, DiS

Sídliště 4

Loštice

789 83



podpis

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

SCHIFFNER, J. *Návrh geometrie VBD pro soustružení materiálu skupiny S*: diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2014, 79s. Vedoucí práce Vrba, V.

Diplomová práce se zabývá testováním vyměnitelných břitových destiček při soustružení slitiny titanu Ti_6Al_4V a slitiny niklu Inconel 718. Tato experimentální činnost byla vypracována ve firmě Pramet Tools, s.r.o., která se zaměřuje na výrobu vyměnitelných břitových destiček. Požadavkem firmy bylo navrhnout geometrii VBD z hlediska trvanlivosti a řezných sil pro soustružení materiálů skupiny ISO S. Podstatou testů byl požadavek na výrobu VBD pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Teoretická část práce se zabývá popisem geometrie řezných nástrojů, superslitin a jejich obrobitelností. Experimentální část práce pojednává o návrhu vhodné řezné geometrie pro obrábění materiálu skupiny ISO S. V závěru je navržena řezná geometrie pro jednotlivé VBD a grafické zhodnocení provedených testů.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

SCHIFFNER, J. *Draft Geometry Inserts for Turning Materials Group S*: Master Thesis. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Working and Assembly, 2014, 79p. Thesis head: Vrba, V.

The master thesis deals with the testing of cutting inserts during turning of titan (Ti_6Al_4V) and nickel (Inconel 718) alloy. This method was developed experimentally in the company Pramet Tools, s.r.o. which focuses on the manufacturing of cutting inserts. The requirement of the company was to design geometry of cutting inserts with regard to the durability and cutting powers for turning of materials from the ISO S-group. The basis of the testing was the production of cutting inserts for materials which are difficult to turn. The theoretical part of the thesis focuses on the description of the cutting tools, superalloys and the turning thereof. The experimental part of the thesis deals with the design of a cutting geometry for turning of materials from the ISO S-group. In the conclusion cutting geometry for individual cutting inserts is designed and a graphical evaluation of the executed testing is presented.

Obsah diplomové práce

Seznam použitých symbolů a značek.....	8
Úvod.....	10
1 Analýza současného stavu	11
2 Superslitiny	13
2.1 Použití superslitin	14
2.2 Rozdělení superslitin.....	14
2.2.1 Superslitiny na bázi kobaltu.....	14
2.2.2 Superslitiny na bázi niklu	15
2.2.3 Superslitiny na bázi niklu a kobaltu	16
2.2.4 Superslitiny na bázi železa.....	16
3 Technologie obrábění materiálu skupiny ISO S.....	17
3.1 Obrobitelnost slitin niklu a titanu	17
3.2 Obrábění titanových a niklových slitin	19
3.2.1 Soustružení titanové slitiny Ti ₆ Al ₄ V	19
3.2.2 Soustružení niklové slitiny Inconel 718	20
3.3 Volba řezného materiálu pro obrábění materiálu skupiny ISO S	21
3.4 Volba řezných podmínek pro obrábění materiálu skupiny ISO S	22
4 Opatření řezného nástroje při obrábění materiálu skupiny ISO S.....	23
4.1 Typické druhy opotřebení VBD při obrábění skupiny ISO S	23
4.2 Měření opotřebení VBD dle normy ISO 3685:1993	24
5 Experimentální část	27
5.1 Charakteristika obráběcího stroje	27
5.2 Soustružený materiál zvolený pro experimentální činnost	28
5.2.1 Slitina titanu Ti ₆ Al ₄ V	28
5.2.2 Slitina niklu Inconel 718	29
5.3 Volba řezného nástroje a řezných materiálů	30
5.3.1 Nožový držák	31
5.4 Použité vyměnitelné břitové destičky	32
5.4.1 Použitá vyměnitelná břitová destička Pramet	32
5.4.2 Použitá vyměnitelná břitová destička Walter	32
5.4.3 Použitá vyměnitelná břitová destička SAFETY	33
5.4.4 Použitá vyměnitelná břitová destička Sandvik	34
5.5 Měření opotřebení vyměnitelných břitových destiček.....	35

5.6	Měření opotřebení VBD při soustružení slitiny titanu Ti_6Al_4V	36
5.7	Měření opotřebení VBD při soustružení slitiny niklu Inconel 718	46
5.8	Měření složek řezné síly při obrábění	57
5.9	Hodnocení silového zatížení v závislosti na opotřebení VBD při soustružení slitiny titanu Ti_6Al_4V	58
5.10	Hodnocení silového zatížení v závislosti na opotřebení VBD při soustružení slitiny niklu Inconel 718	63
6	Návrh geometrie VBD pro skupinu ISO S.....	68
7	Technicko - ekonomické zhodnocení	70
7.1	Technicko - ekonomické zhodnocení pro slitinu titanu Ti_6Al_4V	71
7.2	Technicko - ekonomické zhodnocení pro slitinu niklu Inconel 718.....	72
Závěr		73
Poděkování		75
Seznam použité literatury		76

Seznam použitých symbolů a značek

ZNAČKA	NÁZEV	JEDNOTKA
Al_2O_3	oxid hlinitý	
a_p	hloubka řezu	[mm]
F	výsledná síla	[N]
F_c	řezná síla	[N]
F_f	posuvová síla	[N]
f_n	posuv na otáčku	[mm]
F_p	pasivní síla	[N]
HRC	tvrdost materiálu dle Rockwella	
iC	průměr vepsané kružnice do VBD	[mm]
KB	šířka žlábků	[mm]
KF	vzdálenost žlábků od čela	[mm]
KM	střední vzdálenost žlábků	[mm]
KT	hloubka žlábků	[mm]
l	délka břitů	[mm]
m	hmotnost	[kg]
r	poloměr špičky nástroje	[mm]
RO	rychlořezná ocel	
SiC	karbid křemíku	
SK	slinutý karbid	
TiC	karbid titanu	
TiN	nitrid titanu	
VB	opotřebení na hřbetě	[mm]
VB_B	opotřebení přímé části ostří (průměrné)	[mm]
VB_C	opotřebení v oblasti špičky	[mm]
VBD	vyměnitelná břitová destička	
VB_{\max}	opotřebení maximální	[mm]
VB_N	opotřebení ve formě vrubu	[mm]
v_c	řezná rychlost	[m/min]
VR	radiální opotřebení	[mm]
γ	strukturní složka, základní tuhý roztok	
γ'	základní zpevňující fáze v mnoha niklových superslitinách	

γ''	základní zpevňující fáze ve slitině Inconel 718	
γ_0	ortogonální úhel čela	[°]
λ_s	úhel sklonu ostří	[°]

Úvod

Dnešní doba vede k tomu, že technologie v obrábění se neustále musí zlepšovat a vyvíjet. O tom vypovídá i technologie soustružení, kde je velká pozornost soustředována na konečnou kvalitu obrobeného povrchu vyráběných součástí. Velký podíl na dosaženou kvalitu obrobeného povrchu má geometrie vyměnitelné břitové destičky. Na trhu se vyskytuje celá řada vyměnitelných břitových destiček, které mají různé vlastnosti, proto je nutné zvolit pro každý typ obráběného materiálu jinou geometrii a utvařec.

Výzkum řezných nástrojů probíhá již celou řadu let a jen tak nepřestane. Nároky na řezné nástroje se s vývojem nových materiálů neustále zvyšují. Vývoj nových vyměnitelných břitových destiček zaměstnává stále více firem zabývajících se strojírenskou výrobou. Tento vývoj nových VBD vede k snadnějšímu a efektivnějšímu způsobu obrábění hůře obrobitelných materiálů, jako jsou slitiny titanu a niklu.

V současné době se vyměnitelné břitové destičky z velké části povlakuji a jsou vybaveny tvrdšími otěruvzdornými vrstvami. Vývoj povlaků dosáhl do určité míry určitého pokroku. Povlak na těchto řezných nástrojích je velkým přínosem, a to jak z pohledu ekonomického, tak technického. Povlakem se značně prodlužuje životnost vyměnitelných břitových destiček, což také přispívá k dobrému řeznému výkonu. Geometrie a utvařec VBD mají také vliv na celkovou životnost nástroje.

Firma Pramet Tools, s.r.o., mi zadala porovnat vyměnitelné břitové destičky typu CNMG 120408 z povlakovaného slinutého karbidu pro operaci soustružení materiálů skupiny ISO S. Test byl uskutečněn ve zkušební laboratoři ve firmě Pramet Tools, s.r.o., za účasti kvalifikovaných pracovníků. Testování VBD probíhalo na soustruhu SU50. Materiály, které byly použity: slitina titanu Ti_6Al_4V a slitina niklu Inconel 718. Tyto slitiny se vyznačují vysokou tvrdostí a při jejich obrábění dochází k rychlejšímu opotřebení a zkrácení životnosti VBD.

Cílem experimentálních testů bylo naměřit a porovnat geometrii, řezné síly a trvanlivost povlakovaných vyměnitelných břitových destiček od různých výrobců VBD při suchém soustružení dvou těžkoobrobitelných materiálů skupiny ISO S a stanovit vhodnou geometrii vyměnitelné břitové destičky.

1 Analýza současného stavu

V dnešní době superslitiny čím dál více nabírají na významu. Materiály jako je Inconel, Hastelloy, Waspaloy, Nimonic nebo titan se začaly více používat především v odvětvích: energetice, letectví, kosmonautice a v medicínské technice. Pojem „superslitina” se užívá pro označení velmi širokého pole materiálů, jenž právě slučují vysoké pevnosti, odolnost vůči korozi a creepu za teplot vyšších jak 750 °C. Hlavním znakem všech materiálů této skupiny je matrice, která je plošně centrovaně kubicky uspořádána. Superslitiny jsou velmi těžko obrobitelné a při jejich obrábění dochází k velkému opotřebení vyměnitelných břitových destiček. Proto se při výrobě nástrojů pro obrábění materiálu skupiny ISO S zaměřuje velká pozornost především na druh povlaku a geometrii řezné hrany nástroje. [1]

Geometrie řezného nástroje má značný vliv především na velikost síly řezání a její rozložení do jednotlivých složek, dále také na utváření a odvodu třísky, drsnosti, přesnosti a kvalitě výsledné obrobené plochy, trvanlivosti břitu, hospodárnosti obráběcího procesu. Z uvedených kritérií je patrné: pokud budeme chtít u řezného nástroje minimalizovat ztráty, je důležitá dokonalá znalost vhodné pracovní geometrie břitu a jejího vlivu na proces obrábění. [2]

Při obrábění musí být třísky odváděny od řezné hrany nejlepším možným způsobem. Odvod třísek je ovlivněn především základní geometrií řezného nástroje. Základní geometrii můžeme chápat jako způsob upnutí VBD v držáku. Jsou dvě základní geometrie nástroje, a to pozitivní a negativní. Pozitivní geometrie společně s rovnou plochou čela poskytuje nižší řezné síly a tvorbu tepla a značně lepší odvod třísek z místa řezu. Nevýhoda této geometrie je její menší pevnost. Negativní geometrie s kombinací s rovnou plochou čela zaručuje značně pevný nástroj. Zde vzniká vysoké teplo a horší odvod třísek z místa řezu. [3]

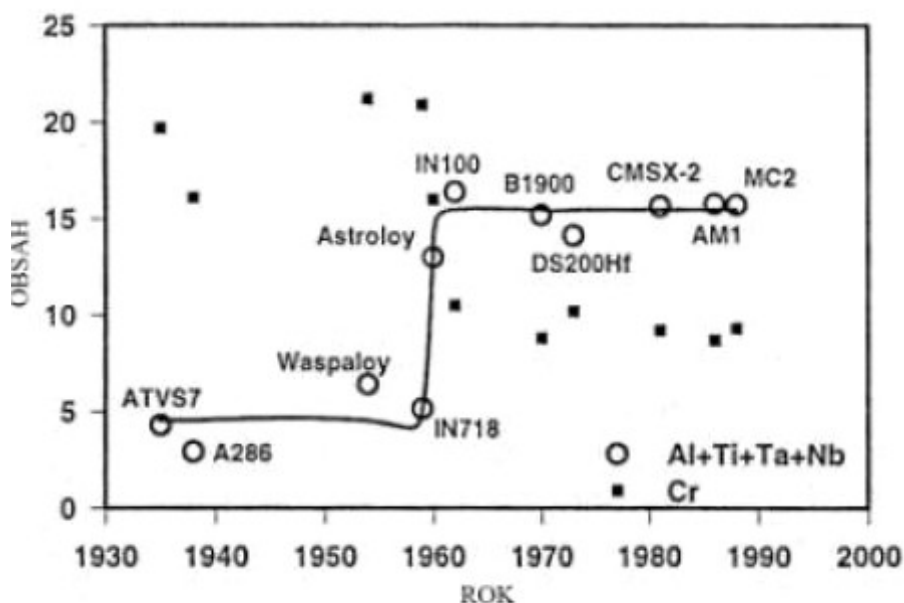
Dobře vytvořená tříska nesmí být ani příliš krátká nebo ani příliš dlouhá. Krátké třísky zkracují životnost řezného nástroje (dochází k vyštipování břitu). Dlouhé třísky mají vliv na samotnou výrobu (poškození obrobku, nástroje, bezpečnost operátora, přerušení výroby, problémy s odvodem třísek). Ideální tvar třísky je krátká spirála. Samotné vyhodnocení řezné geometrie v praxi se uskutečňuje posouzením třísek utvořených během procesu obrábění. Správně tvarované třísky jsou ukazatelem vhodně nastavené řezné geometrie a řezných podmínek. [3]

Metodou obrábění superslitin se zabývala celá řada expertů. Díky tomu vzniklo několik odborných knižních publikací a článků uvedených na internetu a v databázích Scopus a Sciencedirect. Janusz Darecký [5] vydal odbornou knížku, která pojednává o samotných superslitinách a jejich obrábění. Miroslav Neslušan a Andrej Czán [11] vydali knihu, jenž se týká obrábění slitin niklu a titanu. V publikaci jsou popsány vlastností a chování těchto superslitin při obrábění.

2 Superslitiny

Informace o vývoji superslitin jsou známy těsně před 1. světovou válkou, v této době se začaly hledat materiály vhodné pro letecké motory. Jako první materiály se používaly korozivzdorné chromniklové oceli. Postupem času se zvyšovaly požadavky na výkony motorů a tudíž musely být vyvinuty nové slitiny s lepšími vlastnostmi. Tento výzkum se ještě zvyšoval s rozvojem turbín. [1]

Díky 2. světové válce zaznamenaly superslitiny velmi rychlý rozvoj a v roce 1940 byla patentována ve Velké Británii první niklová superslitina NIMONIC. V dalších obdobích bylo hlavní snahou dosáhnout vyššího objemového podílu zpevňující fáze γ' ve struktuře a zmenšit obsah nežádoucích křehkých fází. Na grafu je uvedeno, jak se s touto snahou pozměňoval obsah některých prvků. V první řadě se jednalo o nutnost používání vakuových pecí. S vysokým objemovým podílem γ' fáze klesá tvárnost, z tohoto důvodu je nezbytné slitinu odlévat. Jednou z velmi významných aplikací jsou lopatky rotorů turbín u nichž jsou požadované dobré creepové vlastnosti. Tyto vlastnosti se v posledních desetiletích výrazně zlepšily a to především díky technice usměrněné krystalizace odlitků. Dosáhla se tak kolumnární struktura krystalů orientovaných ve směru osy lopatky. S rozvojem slévárenských technologií se začaly vyrábět monokrystaly, které díky absenci hranic zrn mají neobyčejné creepové vlastnosti a posunuly tak provozní teploty. [1]

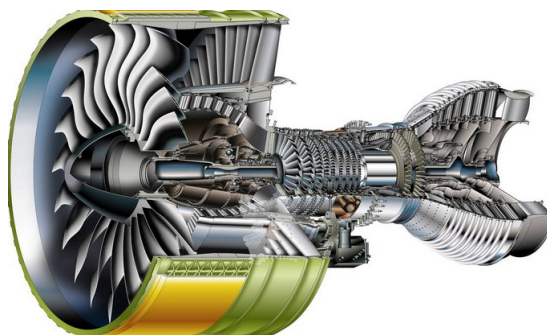


Obr. 2.1 Rozvoj obsahu vybraných přísadových prvků podílejících se na produkci vytvrzující fáze [1]

2.1 Použití superslitin

Superslitiny (také označovány zkratkou HRSA) jsou vysoce legované slitiny. Jedná se především o slitiny na bázi Ni, Co a Fe. Tyto materiály spojuje základní austenitická struktura. Tyto kovy mají velmi totožnou hustotu $\text{Ni} = 8,90$ a $\text{Co} = 8,85 \text{ g/cm}^3$ a teplotu tání $\text{Ni} = 1453 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{Co} = 1495 \text{ }^\circ\text{C}$. Důležitým rozdílem je jen jejich alotropická schopnost. Ni ji nemá, ale Co mění kubickou plošně středěnou mřížku K 12 na hexagonální H 12 při teplotě $418 \text{ }^\circ\text{C}$. [4]

Hlavními vlastnostmi superslitin je dlouhodobá pevnost při teplotách nad $750 \text{ }^\circ\text{C}$. Superslitiny odolávají vysokotepebné korozi a právě pro tuto jejich dobrou tepelnou odolnost se nejvíce používají především v leteckém motoru (viz. obrázek) a to právě na nejvíce exponovaných místech - spalovací turbína. Superslitiny se používají ze stejných důvodů v energetických generátorech, pístových motorech, v petrochemickém průmyslu a také ve speciální technice. [5]



Obr. 2.2 Letecký motor [6]

2.2 Rozdělení superslitin

2.2.1 Superslitiny na bázi kobaltu

Mají nejvyšší pevnost při vysokých teplotách, jsou velmi těžkoobrobitelné. Kobalt je základní prvek této skupiny slitin. Tyto skupiny však také obsahují významné množství niklu, chromu, wolframu. Ze superslitin jsou nejhůře obrobitelné, protože mají velký sklon k vytvrzování. V leteckých motorech se užívají v malé míře, jen v částech s nejvyšší provozní teplotou. [5] Slitiny kobaltu, oproti slitinám niklu, vykazují nejen vynikající odolnost agresivnímu prostředí, ale mají také výbornou pevnost a tvrdost. Tyto vlastnosti si udržují i za zvýšených teplot a proto se slitiny kobaltu využívají na řezné nástroje pracující v agresivním prostředí. Zvláštní aplikací jsou biokompatibilní implantáty. [4]

2.2.2 Superslitiny na bázi niklu

Mají nikl jako hlavní prvek (35 % - 70 %) a podstatný podíl chromu (až do 30 %). Ostatní legující prvky se přidávají pro zvýšení pevnosti nebo odolnosti proti korozi. Kombinace nikl-chrom dává velmi dobrou odolnost vůči oxidaci. Pevnost těchto slitin je větší než mají nerezavějící oceli a to zejména nad 750 °C. Superslitiny niklu mají o něco lepší obrobitelnost než kobaltové superslitiny. [5] Nejjednodušší slitinu Ni představuje Duranickel 301. Jedná se o vytvrditelnou slitinu, dosahující pevnosti 40 HRC. To umožňuje užití jinak měkkého, snadno opotřebitelného niklu. Často se používá především na povrchové protioxidační ochrany. [4]

Monely

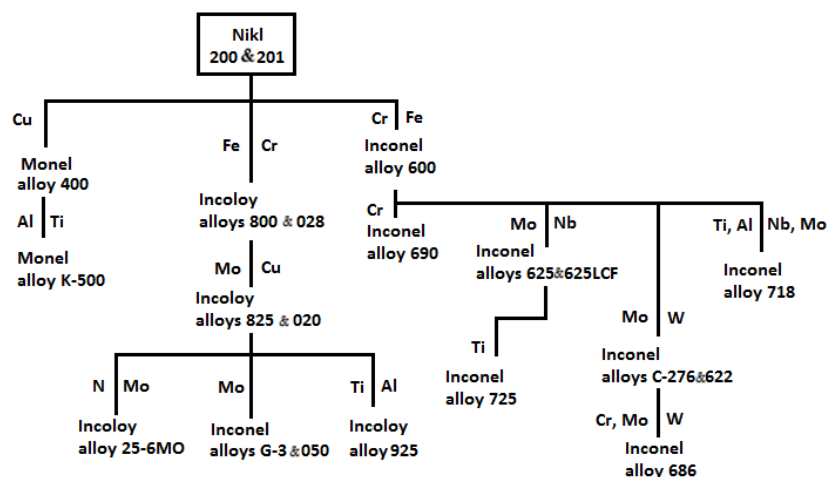
Slitiny niklu a (30 až 32 %) mědi. Mají vysokou odolnost na vzduchu, ve vodě a proti neorganickým kyselinám. Využívají se při stavbě lodí, v ropných rafineriích a farmaceutickém průmyslu. Jsou častým používaným materiálem na kondenzátorové trubky. [4]

Incoloy

Slitiny (30 - 40 %) Ni + 5 % Mo + 20 % Cr, 30 % Fe. Odolnost vůči vysoce koncentrované kyselině sírové. Náchylnost těchto slitin k mezikrystalové korozi se snižuje přilegovaním Ti, Nb a Cu. [4]

Inconel

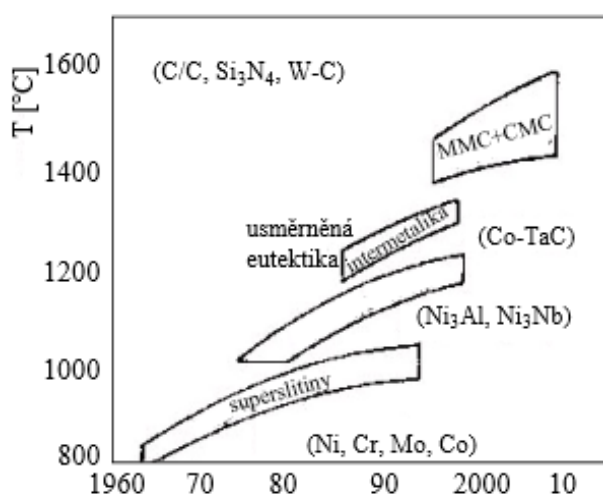
Slitiny Ni + (16 - 29 %) Cr + (6 - 19,5 %) Fe, popřípadě Mo (13 - 16 %). Své uplatnění nachází v silně oxidačních prostředích. Inconely odolávají kyselině solné. Pro zvýšení odolnosti proti korozi jsou dále upravovány Mo nebo Cu. [4]



Obr. 2.3 Rozdělení slitin niklu [4]

2.2.3 Superslitiny na bázi niklu a kobaltu

Vytvrditelné austenitické oceli jsou využitelné do 850 °C. Při vyšších teplotách v rozmezí 850 až 1150 °C se užívají slitiny niklu. Zjednodušeně se někdy označují Nimoniky, právě podle původní slitiny vyrobené v Anglii pod označením Nimonic. Daná žáropevnost způsobuje legování chromem: do 20 %, Ti a Al, vždy do 5 %. Základem žáropevnosti jsou zpevňující fáze typu Ni_3TiAl nebo fáze TiC a TiN. Teplotám okolo hodnoty 1100 °C odolávají právě jen slitiny dolegované 2 - 11 % Mo a 2 - 10 % W 14 - 16 % kobaltu způsobuje další nárůst žáropevnosti. Přídavky B a Zr podporují zpevnění hranic. [4]



Obr. 2.4 Nárůst spalovacích teplot tryskových motorů a použité materiály [4]

Dokonalých pevnostních vlastností za vysokých teplot mají slitiny lité než tvářené. Lité slitiny se často dále tepelně nezpracovávají. U tvářených slitin se uskutečňuje vytvrzování při 700 - 900 °C po dobu 12 - 20 hod. [4]

2.2.4 Superslitiny na bázi železa

Obsahují význačné množství chromu a niklu. Od nerezavějících ocelí, které obsahují 12 - 25 % chromu a 0 - 20 % niklu se odlišují tím, že mají okolo 20 % chromu, ale víc jak 20 % niklu (často 25 - 35 %). Schopnost těchto superslitin pokud jde o uchování si pevnosti při zvýšených teplotách, není totožná s touto vlastností slitin na bázi niklu a kobaltu. Z tohoto důvodu nemohou být využitelné v částech leteckého motoru s nejvyššími teplotami. [5]

3 Technologie obrábění materiálu skupiny ISO S

Slitiny Ni a Ti se díky svým vlastnostem řadí mezi těžkoobrobitelné materiály. Tyto slitiny se vyznačují především specifickými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Obrábění tzv. superslitin je velmi problematické. [7] Právě díky špatné obrobitelnosti těchto materiálů je kladen větší důraz na řezné nástroje. Nástroje používané při obrábění těchto materiálů musí mít podobné vlastnosti jako nástroje pro obrábění korozivzdorných ocelí. A to ostrou geometrii, houževnatý substrát a odolný povlak. V dnešní době se při obrábění právě těchto slitin používá také armovaná (zpevněná) keramika. [8]

3.1 Obrobitelnost slitin niklu a titanu

Pod slovem obrobitelnost označujeme celkový vliv fyzikálních vlastností a chemického složení kovů na průběh a na ekonomické, popřípadě kvalitativní výsledky procesu řezání. Obrobitelnost se může posuzovat z hlediska vlivu materiálu obrobku na intenzitu otěru, energetické bilanci procesu řezání a také jejich vlivu na proces tvoření třísky a tvoření nového povrchu na obrobku. [9] Na obrobitelnost těchto materiálů má především vliv:

Tažnost

Niklové a titanové slitiny se často vyznačují vysokou tažností než běžné oceli. Řezný materiál musí být houževnatější a povlakovaný vrstvou s malou tendencí k adhezi. Řezná rychlost v porovnání s ocelí by měla být vysoká pro omezení vysoké tendence k adhezi. Mimořádnou pozornost je potřeba věnovat malému vylamování řezné hrany (nastává tvorba nárůstků), vrubovému opotřebení a odlupování povlaku. [10]

Deformační zpevnění

Niklové a titanové slitiny mají vysoký vliv k deformačnímu zpevnění. Ostré hrany snižují deformační zpevnění během řezného procesu. Hloubku řezu je nutné stále měnit (sníží se tak riziko vzniku vrubového opotřebení na ostří během obrábění v deformačně zpevněné vrstvě). Je nutné zvolit co možno vysoké posuvy. Vrubové opotřebení a malé vylamování řezné hrany jsou normálním důsledkem této vlastnosti materiálu. [10]

Tepelná vodivost

Niklové a titanové slitiny se vyznačují nízkou tepelnou vodivostí a to způsobuje, že třískami je odváděno málo tepla. Proto je více tepla vnášeno do řezné hrany. To vede k vyšším teplotám na řezné hraně. U řezného materiálu je hlavním kritériem vysoká tvrdost za vysokých teplot. Řezné rychlosti a posuvy se volí pečlivě tak, aby se množství tepla snížilo a co nejvíce bylo odvedeno třískami. Znakem opotřebení nástroje je plastická deformace. [10]

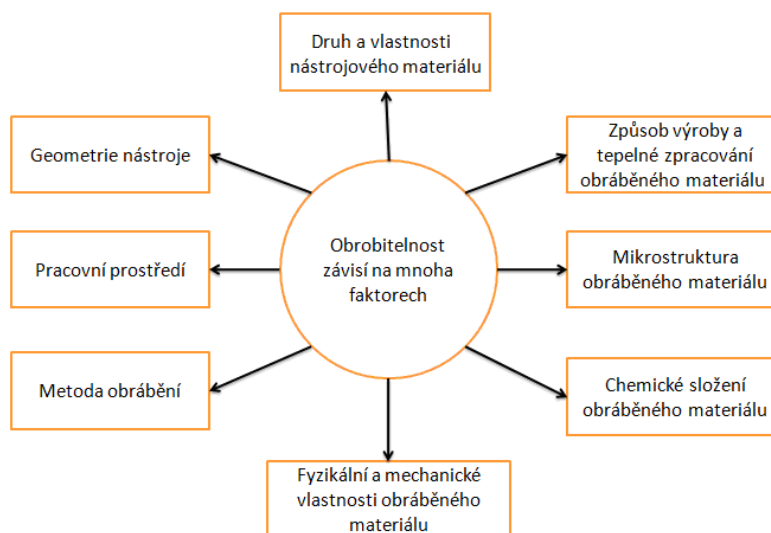
Tvrdost

Niklové a titanové slitiny mají porovnatelnou tvrdost s ocelí. Řezné síly budou tedy téměř stejné jako u oceli a nejsou nutná zvláštní opatření pro kompenzaci řezných sil. Hloubku řezu a posuvy nemusíme nijak omezovat ve srovnání s ocelí. V případě správné volby všech ostatních parametrů by bylo hlavním druhem opotřebení otěr na hřbetu nástroje. [10]

Abrazivnost

Niklové a titanové slitiny jsou hodně abrazivní, proto klademe zvláštní nároky na povlak. Povlaky používané pro použití niklových superslitin musí být vysoce otěruvzdorné. Je hodně důležité maximalizovat využití nástroje. Zvýšená abrazivnost je příčinou vzniku výmolů. [10]

Obrobitelnost je hlavním činitelem pro volbu řezných podmínek a pro funkci nástroje při všech metodách obrábění. [9]



Obr. 3.1 Obrobitelnost [9]

3.2 Obrábění titanových a niklových slitin

Velké množství titanových a niklových slitin se řadí mezi těžkoobrobitelné materiály. Důvody jejich horší obrobitelnosti je možné zhodnotit následovně [11]:

- Udržují si vysokou pevnost i během obrábění, kdy je v zóně řezání vysoká teplota, vzhledem na jejich žárupevnost.
- U niklových slitin v průběhu obrábění dochází především k zřetelnému zpevňování. To je klíčovým faktorem přispívajícím k vytváření výrazné drážky na řezné hraně a to v místě kde končí kontakt nástroje a obrobku.
- Nástrojový materiál je vystavený vysokému abrazivnímu účinku vzhledem na přítomnost značně tvrdých karbidů v obráběném materiálu.
- Při vysokých teplotách charakteristických pro obrábění těchto materiálů se vyskytují chemické reakce při použití běžných nástrojových materiálů. To vede k intenzivnímu difúznímu opotřebení.
- Pro obrábění Ni a Ti slitin je docela často typická tvorba nárůstku na řezné hraně. To způsobuje tvorbu žlábků na čele nástroje.
- Při Ni slitinách se vytváří zpevněné třísky, jenž se těžce formulují, což vede k vytváření kráteru v místě dotyku třísky a nástroje.
- Horší tepelná vodivost niklových a titanových slitin, jenž má za následek vytvoření jak vysokých teplot na hrotě nástroje, tak i vysoký tepelný gradient v nástroji.
- Intenzivní tření v dotyku třísky a nástroje zejména u titanových slitin.

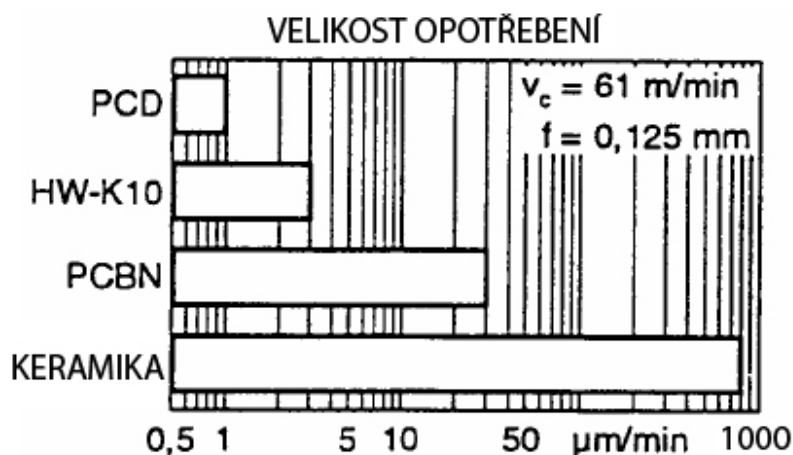
Z uvedeného rozdělení není možné obrábět niklové a titanové slitiny běžnými řeznými podmínkami, jenž se běžně užívají při obrábění ocelí. Titanové a niklové slitiny se obrábí s malými rychlostmi a s dlouhým časem řezání. [11]

3.2.1 Soustružení titanové slitiny $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$

Při soustružení titanu dochází k vytváření nárůstku na špičce nástroje. To vede k předčasnému opotřebení VBD vzhledem k utváření třísky. Velké množství dnešních nástrojových materiálů má tendenci chemicky reagovat s titanem, jakmile teplota přesáhne 511 °C. [12]

Titan má nízkou tepelnou vodivost a to je důvodem výskytu vysokých teplot v místě kontaktu nástroje s obrobkem. Právě vysoké teploty jsou zásadním činitelem způsobující nadměrné opotřebení VBD. [12]

Při soustružení slitiny titanu Ti_6Al_4V kolem 80 % vzniklého tepla proniká díky nízké tepelné vodivosti titanu do nástroje. Tepelná vodivost titanu je kolem 1/6 tepelné vodivosti u běžných ocelí. Titan si drží svoji tvrdost a pevnost i za zvýšených teplot, což především přispívá k opotřebení nástroje. Vysoké mechanické namáhání se vyskytuje v nejbližší oblasti okolí břitu. [12]



Obr. 3.2 Opotřebení při obrábění slitiny Ti_6Al_4V [12]

Obrábění slitin titanu vyžaduje odlišný přístup než u standardních ocelí. Pro vysokou spolehlivost a velmi vysokou trvanlivost nástroje je důležité zajistit: vysokou tuhost nástroje, vhodnou geometrii řezného nástroje s vynikající řezivostí i za vyšších řezných parametrů, vhodnou jakost slinutého karbidu a povlaku pro dlouhou životnost. Umožnit dostatečný přívod procesního média skrz nástroj přímo na břit. [13]

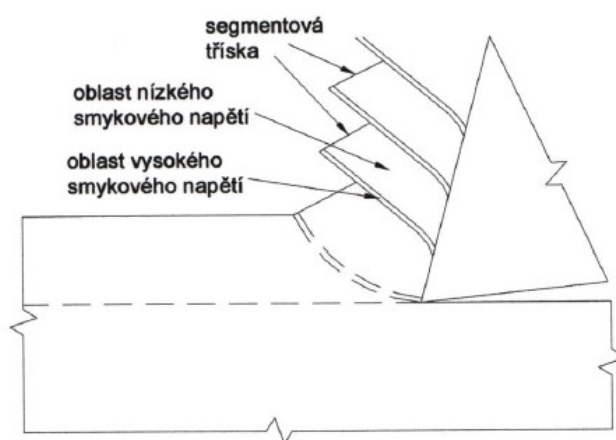
Klíčovým znakem opotřebení při obrábění superslitin je vznik trhlin a nárůstků na břitu řezného nástroje. Právý opak je při obrábění titanu. VBD musí být především odolné proti opotřebení na čele utvařeče. [14]

3.2.2 Soustružení niklové slitiny Inconel 718

Inconel je těžkoobrobitelný materiál běžnými konvenčními metodami a to právě díky svým vlastnostem. Při vjezdu řezným nástrojem do obrobku dochází k vytvoření segmentových třísek a k zpevnění povrchu obráběné součásti. Tyto vlastnosti vedou ke vzniku vysokých dynamických řezných sil. Díky tomuto se používá řezný nástroj z tvrdého materiálu za pomoci metody pomalého a silového řezu. Řezný nástroj musí být vhodně upnutý, což zaručuje zlepšení obrobitelnosti. [11]

Za vysokou pevnost Inconelu 718 může pohyb dislokací mikrostrukturou γ''/γ . To má zejména přímý vliv na jeho obrobiteľnosť. Na obrobiteľnosť má také vliv tažnosť, ktorá stoupá se vzrůstající teplotou, jelikož má za následek zatížení břitu na nástroji. U teploty 800 °C tažnosť získává až skoro 30 %. [15]

Špatná tepelná vodivost materiálu vede ke značnému poškození na vrubu VBD. Při soustružení Inconelu 718 dochází k vysokým teplotám. Tyto teploty mají za následek omezení řezné rychlosti. Doporučuje se použít VBD s pozitivní geometrií a s velkým úhlem nastavení. Z pohledu snížení opotřebení vrubu na VBD a ztenčení třísky se doporučuje použít kruhovou vyměnitelnou břitovou destičku. [16]



Obr. 3.3 Segmentová tříska [11]

3.3 Volba řezného materiálu pro obrábění materiálu skupiny ISO S

Při soustružení titanových a niklových slitin dochází k vysokým teplotám v místě řezu a proto se volí především poměrně nízké řezné rychlosti. Při obrábění těchto slitin je typické, že zóna vysokých teplot je umístěna blíže k řezné hraně. Právě na vysoké teploty v zóně řezání je aplikace nástrojových rychlořezných ocelí pro metodu soustružení titanových slitin omezená. [11]

Požadavky na vyměnitelnou břitovou destičku pro soustružení titanových a niklových slitin by měly obsahovat [11] :

- vysokou pevnost a houževnatost,
- dobrou odolnost vůči opotřebení,
- vysokou pevnost při vysokých teplotách,
- odolnost vůči tepelným rázům,
- dostatečnou chemickou stabilitu při zvýšených teplotách.

Kompozit SiC a Al₂O₃ jako řezný materiál byl vyvinutý zvláště pro obrábění niklových slitin. Tento materiál se obzvláště užívá pro obrábění Inconelu při vysokých řezných rychlostech a posuvech. [11]

3.4 Volba řezných podmínek pro obrábění materiálu skupiny ISO S

Při obrábění superslitin se musí volit nízké řezné rychlosti. Řezné podmínky pro obrábění materiálu skupiny ISO S jsou uvedeny v tabulkách.

Tab. 3.1 Řezné podmínky pro soustružení superslitin negativními VBD [8]

Materiál	Řezné podmínky			Doporučená sorta		Doporučený utvařeč	
	v_c [m/min]	f_n [mm]	a_p [mm]	1.volba	2.volba	Dokončování	Střední obrábění
Slitiny na bázi niklu	30 - 100	0,1 - 0,3	0,1 - 3	PC8110	PC9030	HA (HS)	GS (VM)
Slitiny na bázi železa	30 - 90	0,1 - 0,3	0,1 - 3				
Slitiny na bázi kobaltu	20 - 90	0,1 - 0,2	0,1 - 3				
Titan a jeho slitiny	30 - 100	0,1 - 0,3	0,1 - 3				

Tab. 3.2 Řezné podmínky pro soustružení titanových slitin do pevnosti 1000MPa [11]

a_p [mm]	f [mm]		$r_\epsilon = 0,5$ mm			$r_\epsilon = 1,0$ mm	
			0,08	0,125	0,18	0,25	0,4
0,5	v_c [m/mim]	SK	66	59	54	50	44
		RO	17	14	12	11	
1	v_c [m/mim]	SK	58	52	47	43	39
		RO	15	13	11	10	
2	v_c [m/mim]	SK	51	46	42	39	34
		RO	13	11	10	9	
3	v_c [m/mim]	SK	46	42	39	36	
		RO	12	10	9	8	
5	v_c [m/mim]	SK	43	39	35	33	
		RO	11	9	8	7	

4 Opotřebení řezného nástroje při obrábění materiálu skupiny ISO S

Opotřebení řezného nástroje se vyznačuje spojením mechanických, tepelných, chemických a abrazivních faktorů, při kterých dochází ke složitému zatěžování břitu řezného nástroje. Při obrábění dochází v řezném procesu k relativnímu pohybu nástroje a obrobku, nástroje a třísky – dochází k opotřebení VBD. Při dalším kontaktu řezného nástroje s obrobkem a odcházející třísky je řezný nástroj namáhán na hlavním a vedlejším hřbetu, čele a špičce nástroje. [17]

Druhy opotřebení VBD dělíme [18]:

- **Mechanické opotřebení:** mimo statické zatížení je celá řada různorodých dynamických zatížení, jenž se odvíjí z procesu utváření třísky. Mechanické opotřebení vzniká přerušovanými řezy a vlivem rozdílných hloubek řezu.
- **Tepelné opotřebení:** při obrábění kovů vzniká velké množství tepla. To vzniká na ploše čela a hřbetu vyměnitelné břitové destičky. Tepelné zatížení velmi namáhá materiál řezného nástroje.
- **Chemické opotřebení:** účinkuje při vysokém tlaku a teplotě, kdy vzniká čistý povrch, který má sklony k chemickým reakcím, popřípadě k difuzním procesům.
- **Abrazivní opotřebení:** je opotřebení materiálu působením tvrdých, z velké části minerálních částic. Více jak 50 % všech případů opotřebení řezných nástrojů je způsobeno abrazí. Toto opotřebení vzniká při vzájemném působení tvrdých, zpravidla minerálních částic a funkčního povrchu součástí.

4.1 Typické druhy opotřebení VBD při obrábění skupiny ISO S

U každé operace obrábění dochází k různým druhům opotřebení vyměnitelných břitových destiček. Opotřebení viditelné na VBD nám sděluje informace o průběhu obrábění. Proto je vizuální kontrola VBD během a na konci obrábění velmi důležitá. [19]

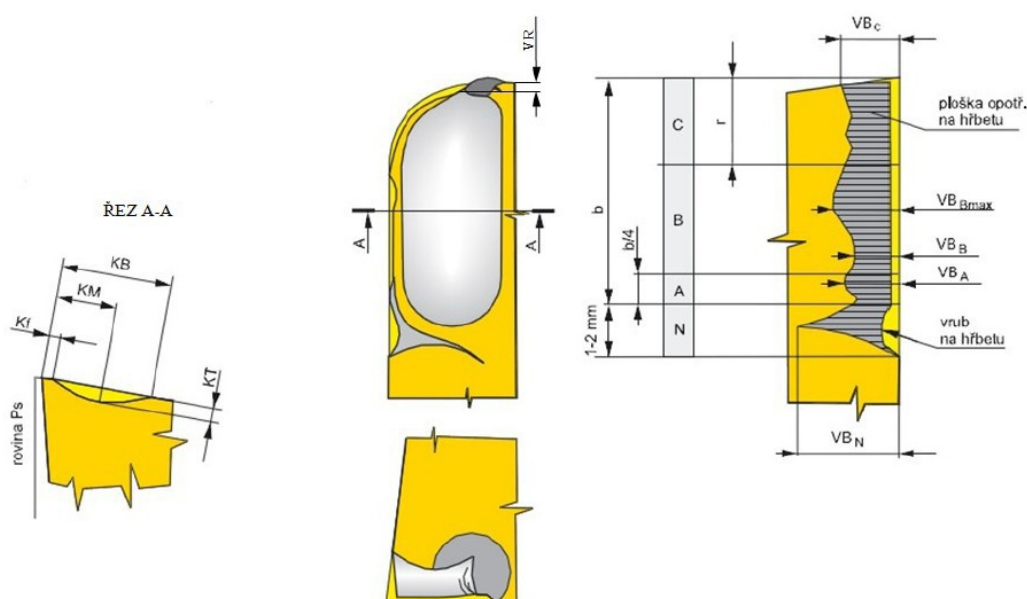
Při obrábění materiálu skupiny ISO S, dochází k intenzivnějšímu opotřebení, řezná hrana nástroje se opotřebovává rychleji než u běžných ocelí, typické opotřebení VBD dle normy pro sledování opotřebení ISO 3685:1993 jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 4.1 Opotřebení VBD [19]

Opotřebení hřbetu	
Žlábkové opotřebení na čele	
Vrubové opotřebení hlavního hřbetu	
Plastická deformace břitu	
Hřbenové trhliny	
Destrukce břitu	

4.2 Měření opotřebení VBD dle normy ISO 3685:1993

Opotřebení břitu obráběcího nástroje můžeme určovat například dle normy ISO 3685:1993. Tato norma uvádí následující formy opotřebení s jednotlivými charakteristikami. Pro měření opotřebení řezných nástrojů je hlavní ostří rozděleno do 4 základních oblastí. Kde oblast C je poloměr ostří, oblast B je přímá část ostří mezi oblastmi C a A. Oblast A je čtvrtina délky opotřebení nejvíce vzdálená od rádiusu nástroje a oblast N je mimo kontakt nástroje a obrobku, přibližně 1 až 2 mm za hlavním ostřím nástroje. [20]



Obr. 4.1 Formy opotřebení dle ISO 3685 [20]

VB – opotřebení na hřbetě,

VB_C – opotřebení v oblasti špičky nástroje,

VB_N – opotřebení ve formě vrubu,

VB_B – opotřebení přímé části ostří (průměrné),

VB_{Bmax} – opotřebení maximální,

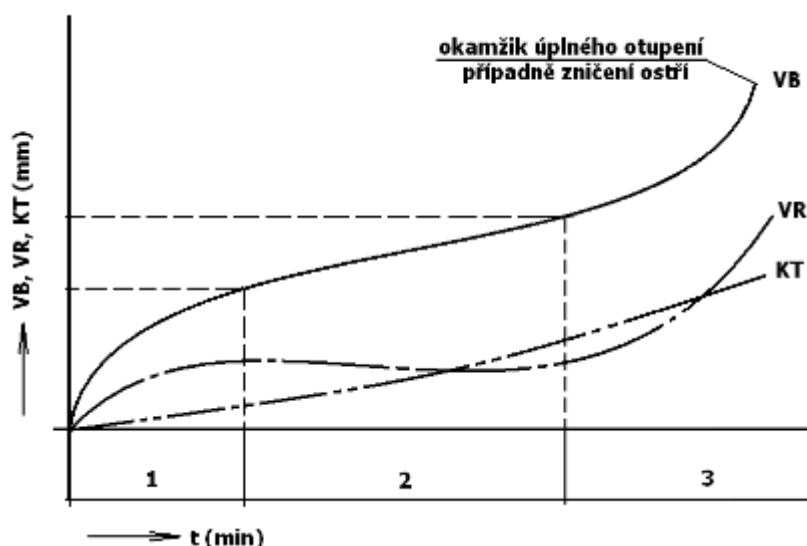
KT – hloubka žlábků,

Kf – vzdálenost žlábků od čela,

KM – střední vzdálenost žlábků,

KB – šířka žlábků,

VR – radiální opotřebení. [20]



Obr. 4.2 Typické průběhy opotřebení VB, VR a KT na době řezání [20]

1 - Oblast zrychleného záběhového opotřebení obecně souvisí se záběhem nástroje a je způsobena vysokým měrným tlakem na vrcholcích nerovnosti nástroje.

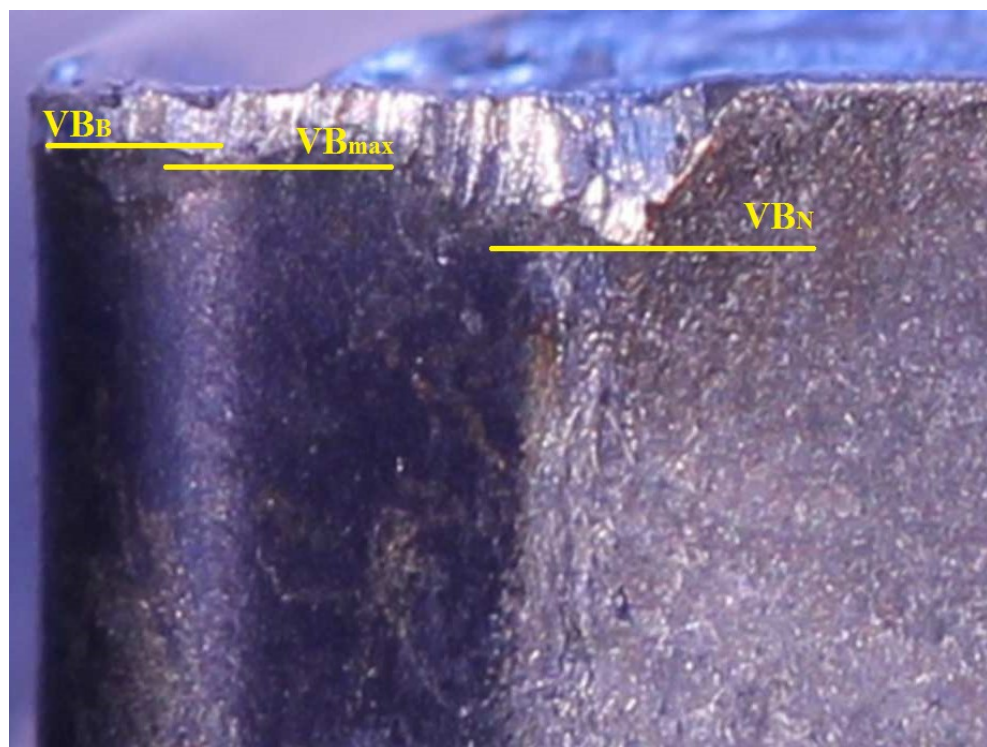
2 - Oblast lineárního opotřebení, v tomto úseku dochází k lineárnímu nárůstu opotřebení a intenzita je konstantní.

3 - Oblast zrychleného nadměrného opotřebení, je to obvykle spojeno s limitní teplotou řezání a poklesem tvrdosti nástroje. Nastává velmi rychlé, zpravidla lavinovité opotřebení.

Nevýhodou měření některých metod je ta, že jsou nepříznivě ovlivněny jednou z následujících záporných stránek, jenž musí být překlenuty. [20]:

- odchod třísek z místa řezu (navíjení na obrobek i nástroj, lámání, zničení nebo poškození snímače),
- procesní kapalina,
- vibrace a chvění stroje,
- doba odezvy, která bývá poměrně dlouhá,
- nízká citlivost a měnící se fyzikální vlastnosti materiálu nástroje a obrobku,
- metody měření nejsou aplikovatelné pro měnící se podmínky řezání.

V běžné praxi se pro určení opotřebení VBD nejčastěji užívá metoda přímého měření mikrometrickou metodou. Při měření opotřebení VBD se musí destička vyjmout z nožového držáku a vložit pod mikroskop.



Obr. 4.3 VBD zobrazení opotřebení VB_B , VB_{max} a VB_N

5 Experimentální část

Cílem této diplomové práce bylo stanovit vhodnou geometrii VBD pro operaci soustružení titanových a niklových slitin. Testy byly provedeny ve zkušební laboratoři v podniku Pramet Tools, s.r.o. za přítomnosti zkušených pracovníků. Stanovení vhodné geometrie vyměnitelné břitové destičky bylo provedeno podélným soustružením válce materiálu Ti_6Al_4V a Inconelu 718. Při testech bylo použito celkem pět vyměnitelných břitových destiček ze slinutého karbidu od různých výrobců: Pramet - CNMG 120408-SM, Walter - CNMG 120408-NRS, Walter - CNMG 120408E-NRT, SAFETY - CNMG 120408-M5, Sandvik - CNMG 120408-SMR. U každé VBD bylo po stanoveném intervalu provedeno měření průběhu opotřebení. Vyměnitelná břitová destička, která dosáhla nejdelšího času během obrábění, minimálního opotřebení a způsobila vznik nízkých řezných sil, vhodného utváření třísek v celém zadaném rozsahu, byla stanovena jako nejvhodnější pro soustružení titanových a niklových slitin. Pro operaci soustružení titanových a niklových slitin byl použit nepřerušovaný řez bez použití procesní kapaliny na stroji SU50.

5.1 Charakteristika obráběcího stroje

Pro soustružení titanových a niklových slitin se doporučuje používat co možno nejužší možný stroj tak, aby se zabránilo vlivu vibrací na řezný proces. Pro proces obrábění slitin byl zvolen soustruh SU50. Důvod volby tohoto stroje byl ten, že má velmi tuhou konstrukci a zaručuje maximální stabilitu při soustružení zvolených slitin.



Obr. 5.1 Soustruh SU50 [21]

Tab. 5.1 Technické parametry soustruhu SU50 [21]

Výrobce	TOS Lipník nad Bečvou
Průměr nad ložem	500 mm
Oběžný průměr nad suportem	250 mm
Vzdálenost mezi hroty	1000 mm
Vrtání vřetene	56 mm
Rozsah otáček	11,2 – 1400 ot/min

5.2 Soustružený materiál zvolený pro experimentální činnost

Při experimentech byly použity materiály: slitina titanu Ti_6Al_4V a slitina niklu Inconel 718. Dle normy ISO 513 do skupiny ISO S patří speciální žárovevné slitiny na bázi Ni, Co, Fe a Ti. Tyto slitiny se vyznačují svojí odolností proti korozi a také svojí vysokou pevností za zvýšených teplot.

5.2.1 Slitina titanu Ti_6Al_4V

Slitina Ti_6Al_4V patří do skupiny ISO S. Značení této slitiny dle normy DIN je W.Nr 3.7164. Tato slitina titanu je nejběžnější slitina, která svým průmyslovým využitím zahrnuje až 50 % z celkového využívání slitin titanu. Slitina Ti_6Al_4V má pevnost v tahu až 1125 MPa. Doporučuje se pro užití v provozních teplotách do teplot zhruba okolo 350 °C. Tato slitina poskytuje seskupení vysoké pevnosti, malé hmotnosti, dobrou svařitelnost a odolnost proti korozi, jenž udělala z materiálu světový standard pro použití v leteckém průmyslu. Působení kyslíku nebo vody má vliv na tuto slitinu, okamžitě se vytváří samovolně stabilní, souvislý, pevně přilnutý oxidický povlak. Právě tento povlak odpovídá za jeho vynikající odolnost proti korozi v různě agresivních prostředích. Slitina Ti_6Al_4V je vysoce odolná vůči plošné korozi ve vodních roztocích, stejně tak i v oxidačních kyselinách, chloridech, pohonných hmotách a zásadách. [22]

Slitiny titanu mají sklon k vodíkové křehkosti. Plynný nebo katodický vodík může difundovat do kovu a vytvářet křehké hydridy. Proto je nutné během výroby a to zpravidla tepelného zpracování a moření v kyselinách minimalizovat množství vodíkových vměstků. [22]

Tab. 5.2 Chemické složení (hmotnost %) slitiny Ti₆Al₄V [24]

C	Fe	Al	V	Ti
0,10	0,4	5,5 – 6,75	3,5 – 4,5	zbytek

Tab. 5.3 Mechanické vlastnosti slitiny Ti₆Al₄V [23]

Hustota [kg/ dm ³]	Teplota změny $\beta - \alpha$ [°C]	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Mez kluzu [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Použitelnost [°C]
4,42	999	1000	910	114	do 400

5.2.2 Slitina niklu Inconel 718

Inconel 718 je vysoce legovaná slitina niklu. Značení této slitiny dle normy DIN je W.Nr 2.4668. Chemický vzorec je NiCr19NbMo. Tento materiál patří mezi superslitiny. Jeho využití je zejména při vysokých teplotách a tam, kde je zvýšená náchylnost ke korozi. Hlavní složkou Inconelu 718 je nikl (Ni), jenž je feromagnetický, kujný a tažný kov, odolávající korozi. [25]



Obr. 5.2 Inconel 718 [26]

Slitina niklu Inconel 718 byla především vyvinuta pro vesmírné účely. Užití Inconelu 718 je také v civilní oblasti. Např. použití této slitiny niklu je zejména v oblastech, kde působí dlouhodobé nepříznivé vlivy prostředí (oxidace, vysoká teplota, mořská voda).

Inconelu 718 se používá zejména v plynových turbínách, těsnění spalovacích komor, v generátorech jaderných tlakovodních reaktorů, na nádrží raket atd. Inconel 718 našel použití při výrobě raketového letadla X-15 nebo při konstrukci Joint European Torus (JET) plavidla. [27], [28], [29], [30] Užití této slitiny niklu Inconelu 718 je v rozmezí teplot - 253 až 750 °C a však některé informace tvrdí dokonce rozmezí teplot - 423 až 1600 °C a je vysoce odolný proti korozi. Mechanické vlastnosti této slitiny niklu mají zejména vliv na teplotu a dobu při jeho zpracování. Právě tyto vlastnosti ovlivňují i funkční vlastnosti této superslitiny. Značně důležitým zpracováním je takzvané srážení kalením, jenž obsahuje procesy jako je kalení a žíhání či stárnutí. [15]

Tab. 5.4 Chemické složení (hmotnost %) slitiny Inconel 718 [25]

Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	Co	Mn	Cu
50-55	17-21	zůstatek	2,8-3,3	4,75-5,5	1	0,35	0,2-0,8
Al	Ti	Si	C	S	P	B	
0,65-1,15	0,3	0,35	0,08	0,015	0,0015	0,006	

Tab. 5.5 Mechanické vlastnosti Inconelu 718 [25]

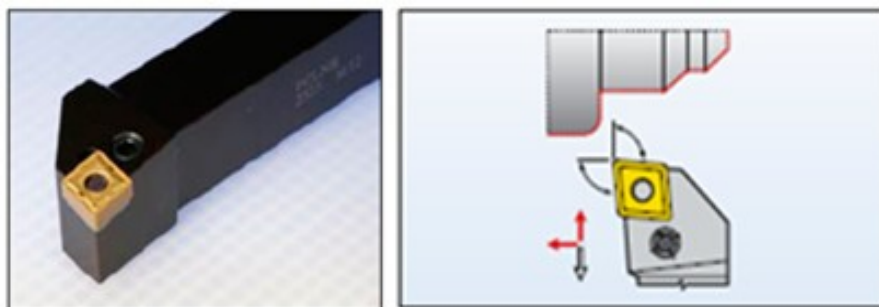
Měrná hmotnost [g/cm ³]	Teplota tavení [°C]	Modul Pružnosti v tahu [GPa]	Modul pružnosti ve smyku [GPa]	Tvrdost HRC	Mez pevnosti v tahu [MPa]
8,19	1336	204,9	77,2	36	1240

5.3 Volba řezného nástroje a řezných materiálů

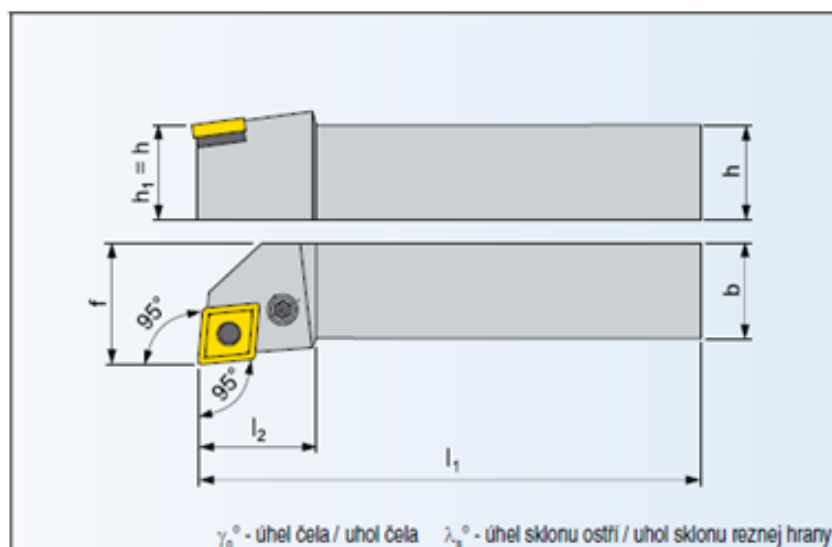
Pro provedení testů byly použity vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu. Celkem bylo použito pět řezných vzorků: Pramet - CNMG 120408-SM, Walter - CNMG 120408-NRS, Walter - CNMG 120408E-NRT, SAFETY - CNMG 120408-M5, Sandvik - CNMG 120408-SMR. Tyto vyměnitelné břitové destičky byly upevněny do nožového držáku podniku Pramet Tools, s.r.o. Pro řezné nástroje byl použit typ držáku PCLNR 3225 P12.

5.3.1 Nožový držák

Použitý nožový držák pro upínání vyměnitelných břitových destiček měl negativní geometrii břitu. Do lůžka tohoto držáku byly VBD upevněny pomocí upínacího šroubu. Do nožového držáku byly upevňovány destičky ve tvaru kosočtverce.



Obr. 5.3 Nožový držák PCLNR 3225 P12 [31]



Obr. 5.4 Grafické znázornění nožového držáku PCLNR 3225 P12 [31]

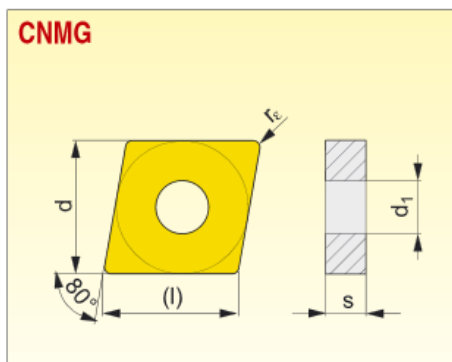
Tab. 5.6 Parametry nožového držáku [31]

ISO	R/L	Rozměry [mm]							m [kg]
		$h=h_1$	b	f	l_1	l_2	λ_s	γ_0	
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[°]	[°]	
PCLNR 3225 P12	*/*	32	25	32	170	36	-6	-6	0,85

5.4 Použité vyměnitelné břitové destičky

5.4.1 Použitá vyměnitelná břitová destička Pramet

Od podniku Pramet Tools, s.r.o. byla v experimentu použita VBD ve tvaru kosočtverce s označením CNMG 120408-SM. Tato destička je zobrazena na obrázku a v tabulce jsou uvedeny základní rozměry vyměnitelné břitové destičky.



Obr. 5.5 Vyměnitelná břitová destička CNMG 120408-SM [32]

Tab. 5.7 Parametry VBD podniku Pramet Tools, s.r.o. [32]

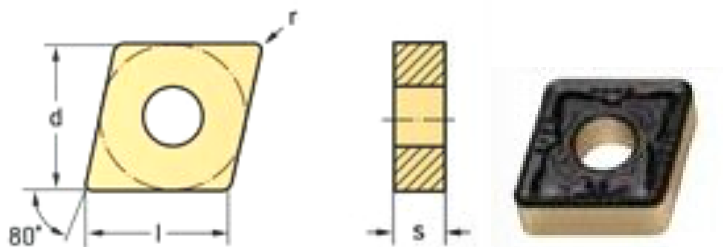
Velikost	l [mm]	d [mm]	d ₁ [mm]	s [mm]	r _ε [mm]
120408 - SM	12,9	12,7	5,16	4,76	0,8

Tab. 5.8 Doporučené řezné podmínky výrobce [32]

a _p [mm]	f [mm]
0,8 - 6,0	0,17 - 0,60

5.4.2 Použitá vyměnitelná břitová destička Walter

Od podniku Walter CZ, s.r.o. byly v experimentu použity VBD ve tvaru kosočtverce s označením CNMG 120408-NRS a CNMG 120408E-NRT. Tyto destičky jsou zobrazeny na obrázku a v tabulce jsou uvedeny základní rozměry vyměnitelné břitové destičky.



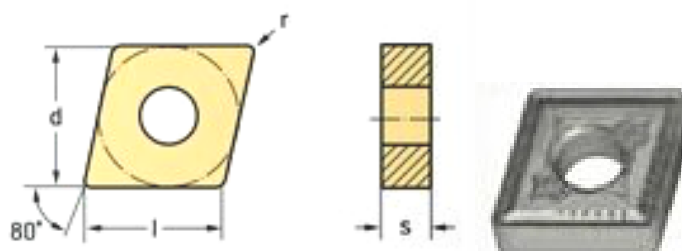
Obr. 5.6 Vyměnitelná břitová destička CNMG 120408-NRS [33]

Tab. 5.9 Parametry VBD podniku Walter CZ, s.r.o. [33]

Velikost	l [mm]	d [mm]	d ₁ [mm]	s [mm]	r [mm]
120408 - NRS	12,9	12,7	5,16	4,76	0,8

Tab. 5.10 Doporučené řezné podmínky výrobce [33]

a _p [mm]	f [mm]
1,0 - 4,0	0,16 - 0,35



Obr. 5.7 Vyměnitelná břitová destička CNMG 120408E-NRT [33]

Tab. 5.11 Parametry VBD podniku Walter CZ, s.r.o. [33]

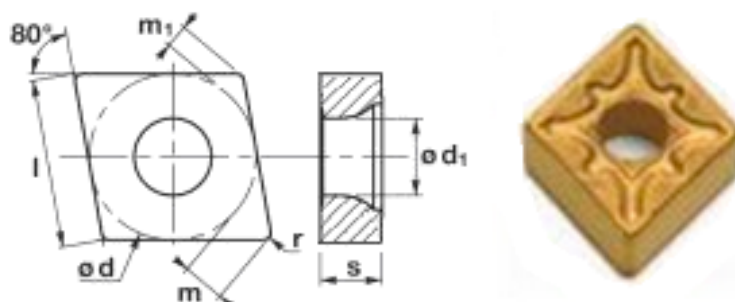
Velikost	l [mm]	d [mm]	d ₁ [mm]	s [mm]	r [mm]
120408E - NRT	12,9	12,7	5,16	4,76	0,8

Tab. 5.12 Doporučené řezné podmínky výrobce [33]

a _p [mm]	f [mm]
1,0 - 6,0	0,18 - 0,35

5.4.3 Použitá vyměnitelná břitová destička SAFETY

Od podniku SAFETY, s.r.o. byla v experimentu použita VBD ve tvaru kosočtverce s označením CNMG 120408-M5. Tato destička je zobrazena na obrázku a v tabulce jsou uvedeny základní rozměry vyměnitelné břitové destičky.



Obr. 5.8 Vyměnitelná břitová destička CNMG 120408-M5 [34]

Tab. 5.13 Parametry VBD podniku SAFETY, s.r.o. [34]

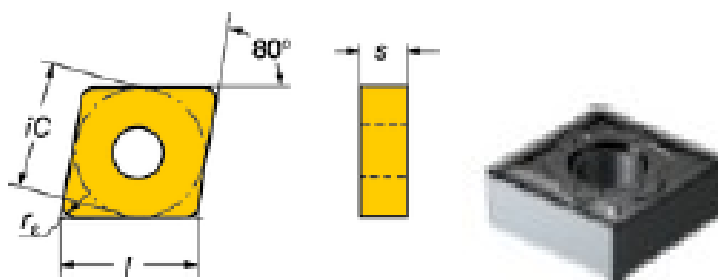
Velikost	d [mm]	l [mm]	s [mm]	m [mm]	m ₁ [mm]	d ₁ [mm]	r [mm]
120408 - M5	12,9	12,7	4,76	3,088	1,697	5,16	0,8

Tab. 5.14 Doporučené řezné podmínky výrobce [34]

a _p [mm]	f [mm]
1,0 - 5,0	0,19 - 0,35

5.4.4 Použitá vyměnitelná břitová destička Sandvik

Od podniku Sandvik CZ, s.r.o. byla v experimentu použita VBD ve tvaru kosočtverce s označením CNMG 120408-SMR. Tato destička je zobrazena na obrázku a v tabulce jsou uvedeny základní rozměry vyměnitelné břitové destičky.



Obr. 5.9 Vyměnitelná břitová destička CNMG 120408-SMR [35]

Tab. 5.15 Parametry VBD podniku Sandvik CZ, s.r.o. [35]

Velikost	l [mm]	iC [mm]	d ₁ [mm]	s [mm]	r _ε [mm]
120408 - SMR	12,9	12,7	5,16	4,76	0,8

Tab. 5.16 Doporučené řezné podmínky výrobce [35]

a _p [mm]	f [mm]
1,0 - 3,0	0,16 - 0,3

5.5 Měření opotřebení vyměnitelných břitových destiček

Měření opotřebení čela a hřbetu vyměnitelných břitových destiček bylo uskutečněno mikrometrickou metodou. U této metody je velikost opotřebení VBD určována přímým měřením lineárních rozměrů. Při měření byl užit mikroskop, který byl vybaven digitální kamerou, což umožnilo několikanásobné zvětšení obrazu. Díky propojení mikroskopu s počítačem bylo možné velice přesně změřit opotřebení a udělat fotky opotřebení řezné hrany na VBD. Vyhodnocení opotřebení VBD bylo uskutečněno pomocí dílenského mikroskopu Carl Zeiss Jena s elektronickým odměřováním souřadnic. Stanovení opotřebení bylo v souladu s normou ISO 3685:1993.



Obr. 5.10 Carl Zeiss Jena pro měření opotřebení VBD

Fotky jednotlivých opotřebení vyměnitelných břitových destiček byly pořízeny binokulárním stereomikroskopem Vision Engineering SX45 s připojenou digitální kamerou.



Obr. 5.11 Stereomikroskop - Vision Engineering SX45

5.6 Měření opotřebení VBD při soustružení slitiny titanu Ti_6Al_4V

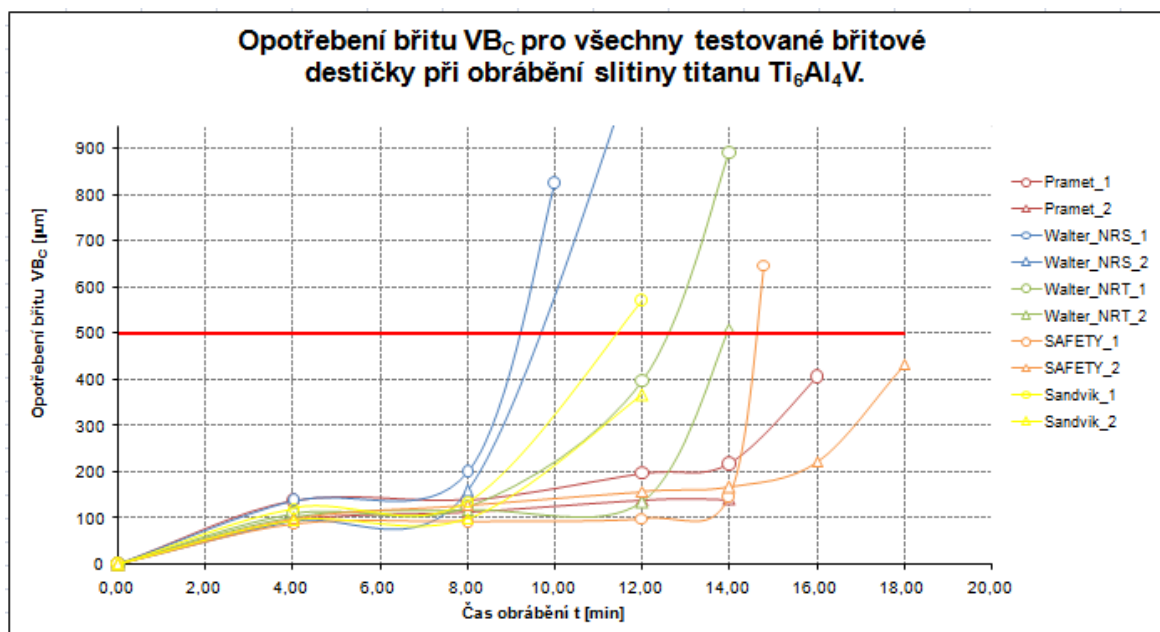
U experimentálního měření opotřebení se provádělo dvojí měření řezného vzorku. Pro první měření byl odebíraný materiál za 1 přejezd 66 cm^3 a posuv na otáčku byl $0,25 \text{ mm}$. U druhého měření byl odebraný materiál za 1 přejezd $52,8 \text{ cm}^3$ a posuv na otáčku byl $0,2 \text{ mm}$. Kritériem pro ukončení testů bylo zvoleno opotřebení na hřbetě $500 \text{ }\mu\text{m}$. Použité řezné podmínky pro testy trvanlivosti VBD při obrábění slitiny titanu Ti_6Al_4V byly následující:

Tab. 5.17 Řezné podmínky

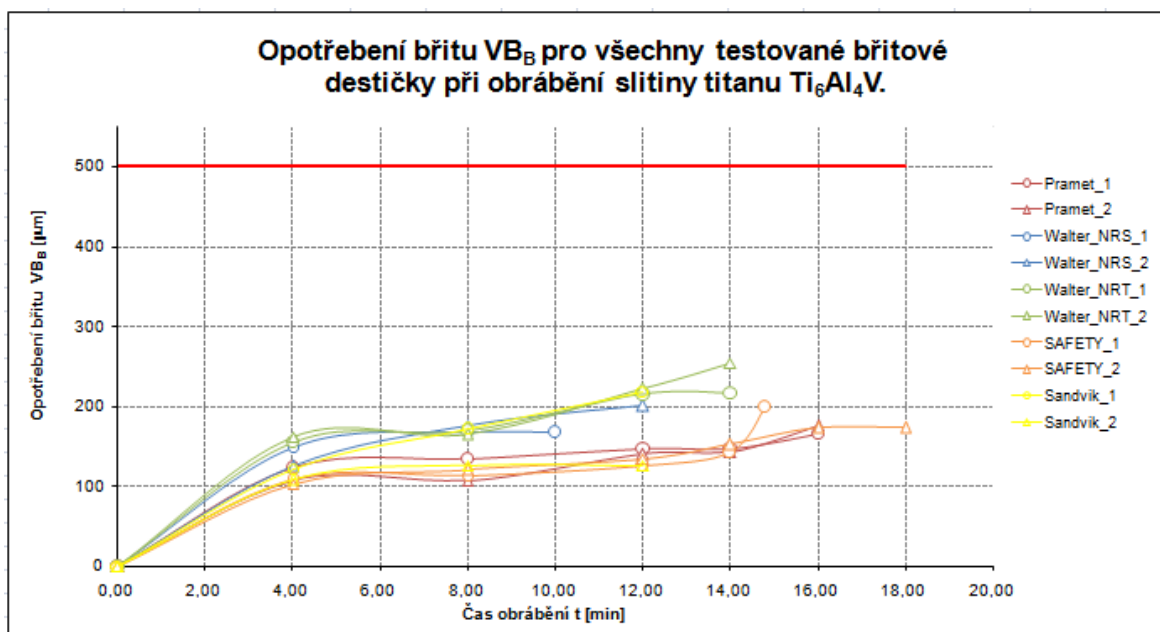
Řezná rychlost	v_c	[m/min]	44
Posuv na otáčku	f_n	[mm]	0,25
Axiální hloubka řezu	a_p	[mm]	2

Obrobitelnost těchto slitin je velmi obtížná ve srovnání s běžnou ocelí i s korozivzdornou ocelí. Slitina titanu má velmi malou tepelnou vodivost a udržuje si pevnost i za vysokých teplot. Tyto okolnosti sebou přináší vznik vysokých řezných sil a velkého množství tepla v oblasti řezu. Velký podíl tepla taktéž přechází do nástroje. Vysoce smykově deformované tenké třísky s abrazivními sklony udržují styk s čelem nástroje v úzké oblasti. Vznikající síly jsou soustředěny do blízkosti řezné hrany. Je-li řezná rychlost příliš vysoká, dochází k chemické reakci mezi třískou a materiálem řezného nástroje, která může mít za následek intenzivní opotřebení vyměnitelné břitové destičky. V porovnání s niklovými slitinami je řezný odpor u titanových slitin o cca 30 až 40 % nižší, to klade malé nároky na únosnost a mechanické zatížení břitu.

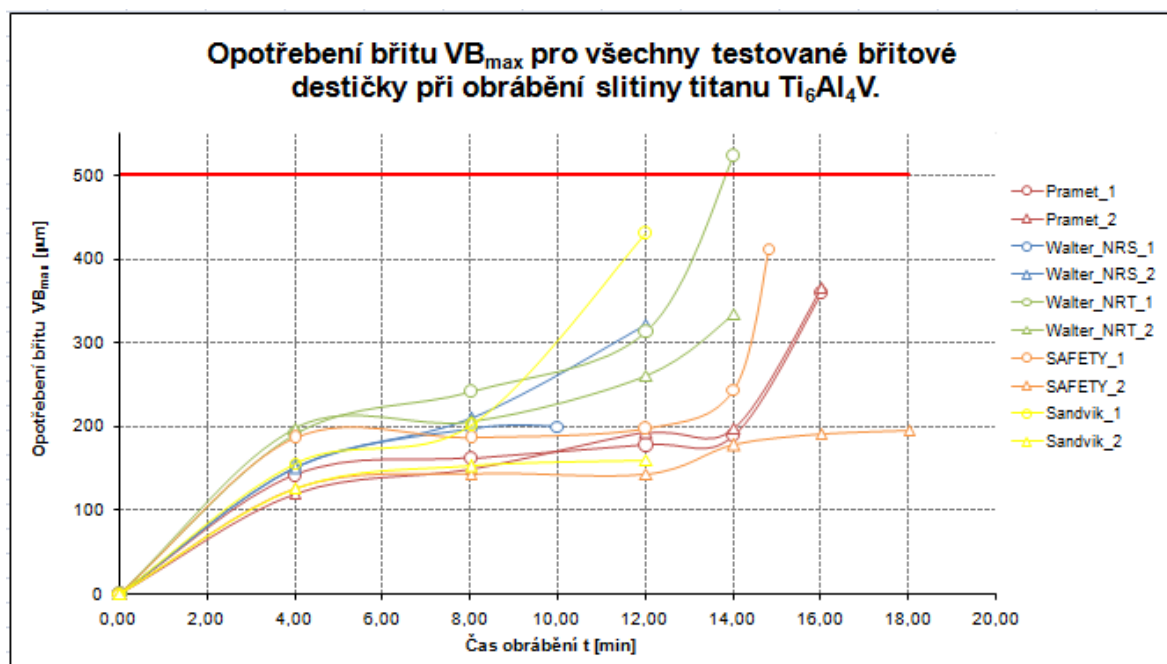
Z výsledků a průběhu testů je jasné viditelné, že kritickým faktorem pro trvanlivost břitu vyměnitelné břitové destičky je jednoznačně odolnost proti působení vysokých teplot a odolnost proti opotřebení ve formě výmolu (žlábků) na čele břitu. Na konci trvanlivosti břitu docházelo k naprostému opotřebení řezné hrany na špičce VBD a v místě výmolu na čele (utvařeči) břitu. To je dobře viditelné z průběhu parametru VB_C a ze snímků opotřebení čel břitů VBD (Tab. 5.18, Tab. 5.19).



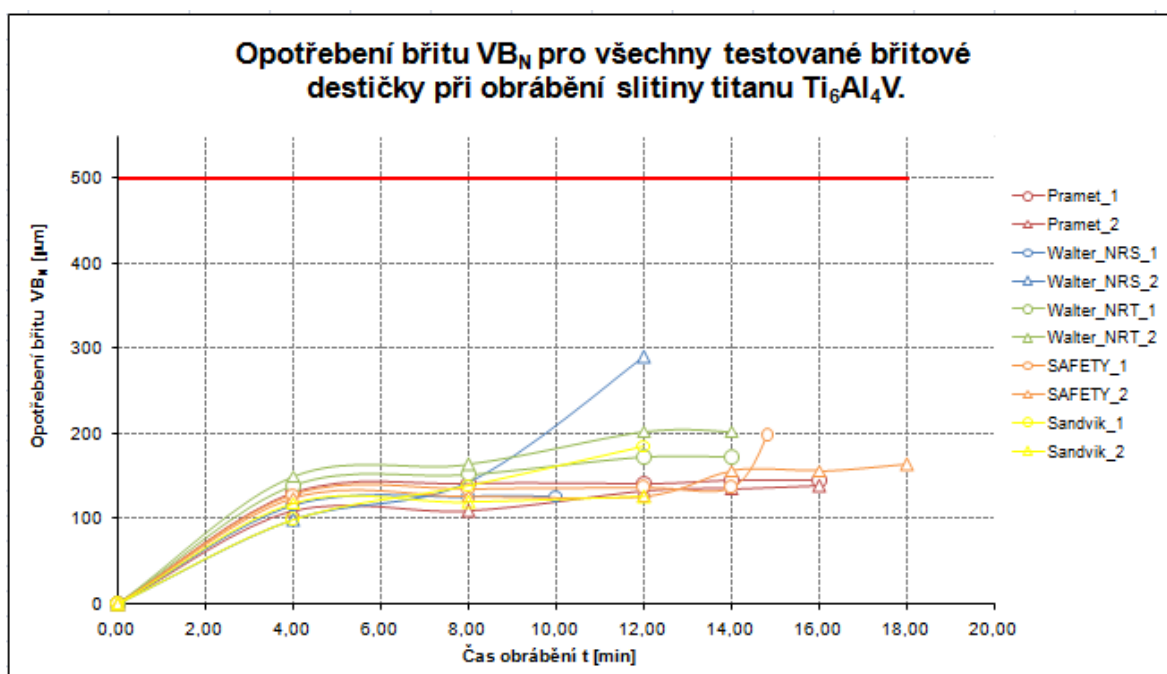
Obr. 5.12 Závislost průběhu opotřebení VB_C na době obrábění pro všechny použité VBD při obrábění titanové slitiny Ti_6Al_4V



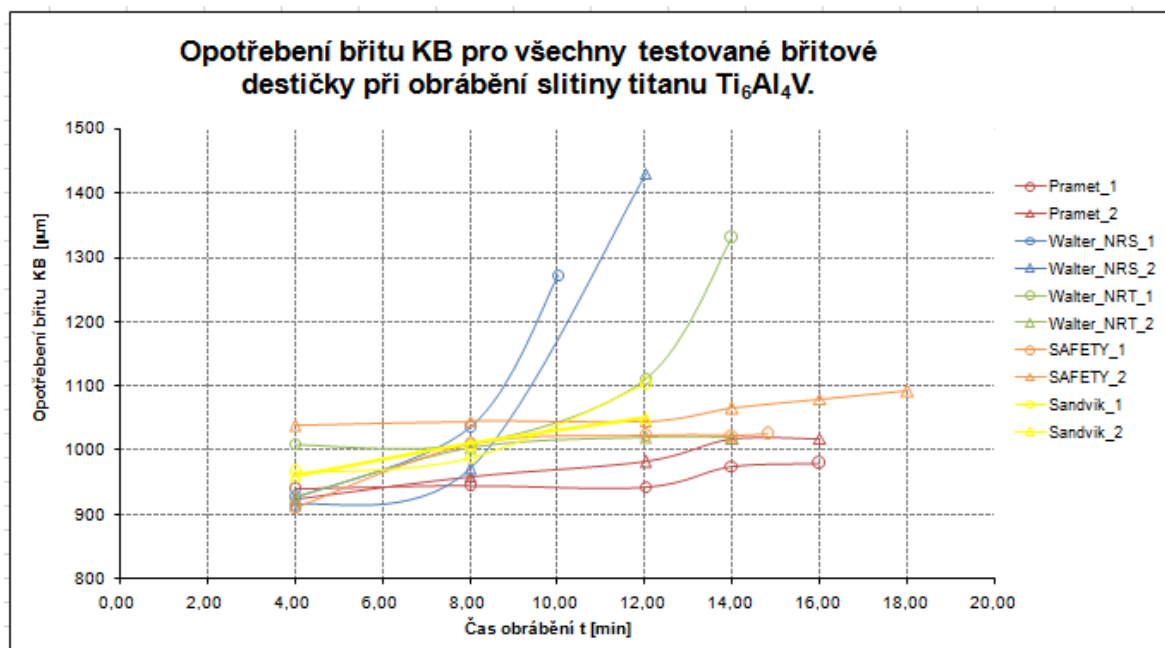
Obr. 5.13 Závislost průběhu opotřebení VB_B na době obrábění pro všechny použité VBD při obrábění titanové slitiny Ti_6Al_4V



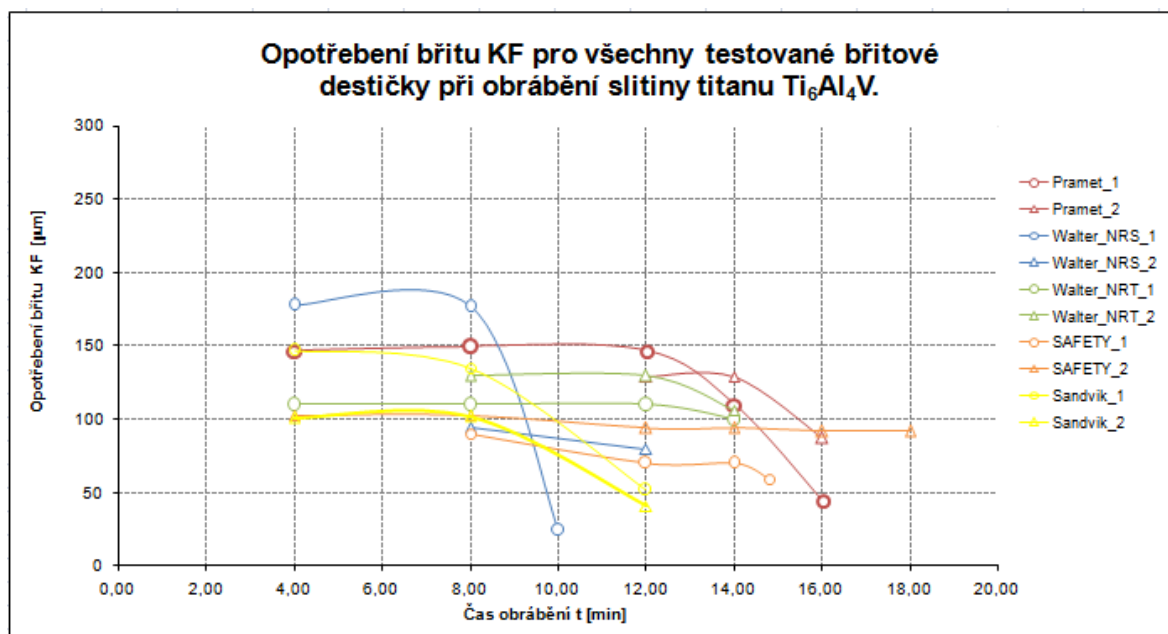
Obr. 5.14 Závislost průběhu opotřebení VB_{max} na době obrábění pro všechny použité VBD při obrábění titanové slitiny Ti_6Al_4V



Obr. 5.15 Závislost průběhu opotřebení VB_N na době obrábění pro všechny použité VBD při obrábění titanové slitiny Ti_6Al_4V

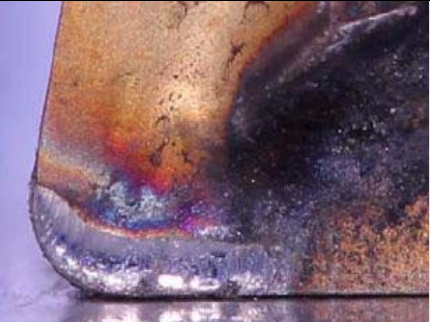




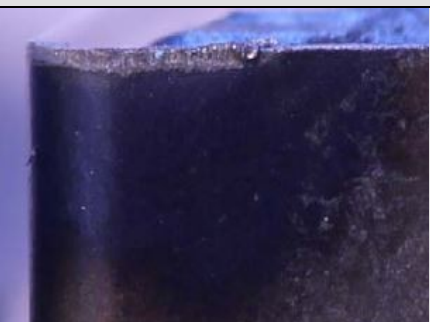
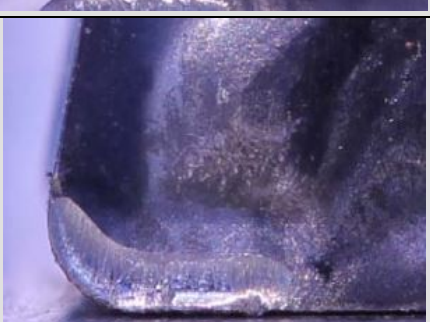

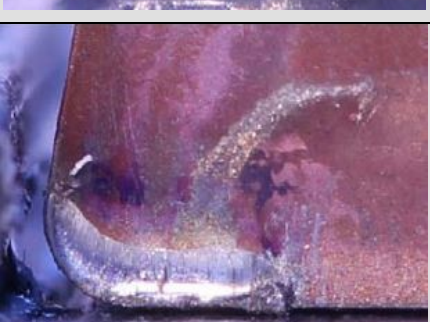
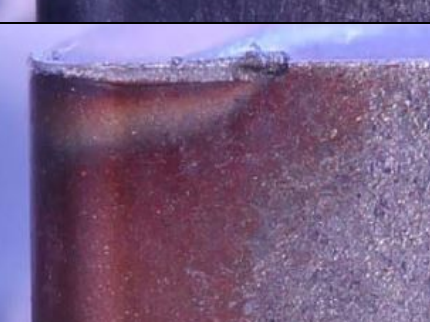


Obr. 5.16 Závislost průběhu opotřebení KB na době obrábění pro všechny použité VBD při obrábění titanové slitiny Ti_6Al_4V

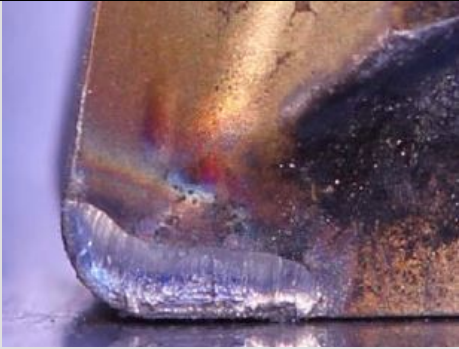
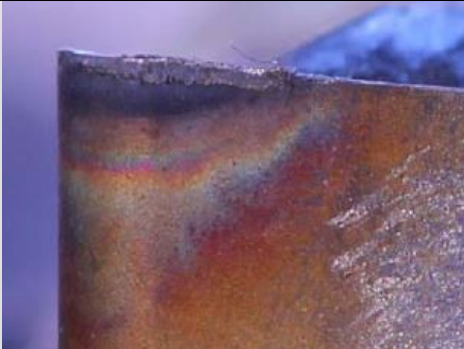
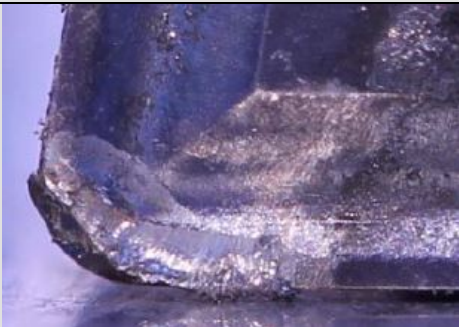
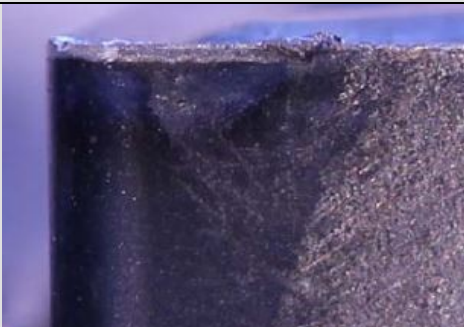




Obr. 5.17 Závislost průběhu opotřebení KF na době obrábění pro všechny použité VBD při obrábění titanové slitiny Ti_6Al_4V

Tab. 5.18 Snímky stavu břitu VBD po 8 minutách soustružení slitiny titanu Ti_6Al_4V

Opotřebení VBD po 8 minutách soustružení titanové slitiny Ti_6Al_4V			
Pramet CNMG 120408-SM			
Walter CNMG 120408-NRS			
Walter CNMG 120408-NRT			
SAFETY CNMG 120408-M5			
Sandvik CMNG 120408-SMR			

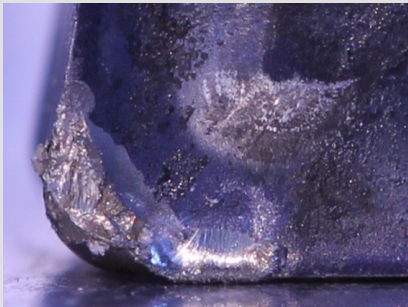
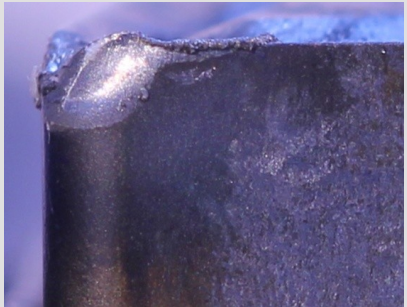

Tab. 5.19 Snímky stavu bříty VBD po 14 minutách soustružení slitiny titanu Ti_6Al_4V

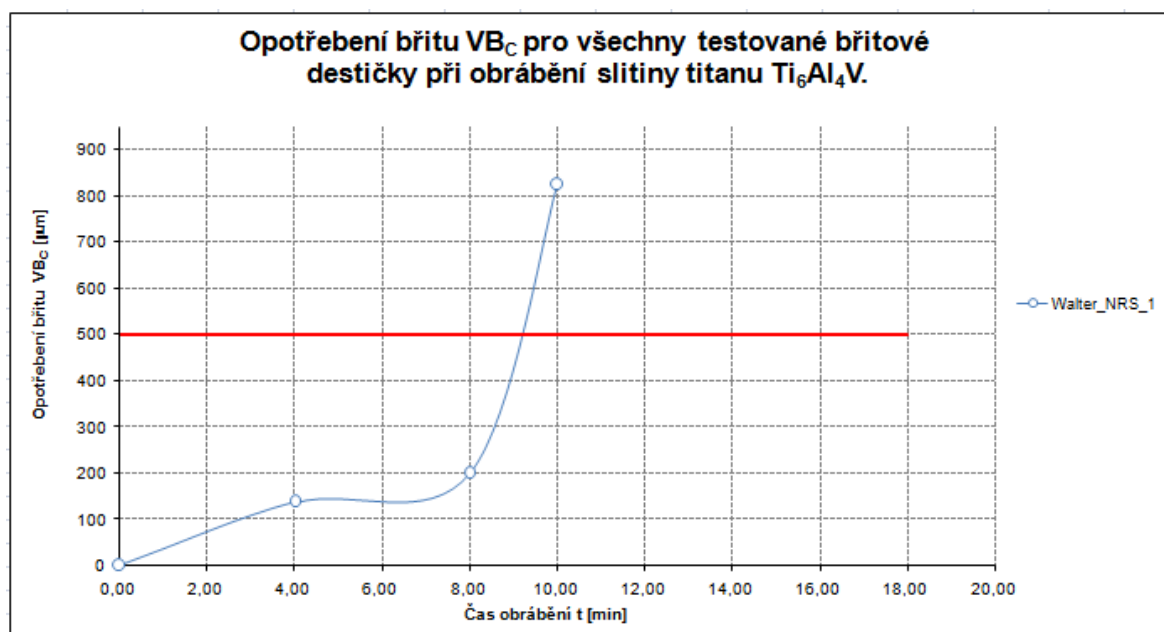
Opotřebení VBD po 14 minutách soustružení titanové slitiny Ti_6Al_4V		
Pramet CNMG 120408-SM		
Walter CNMG 120408-NRS	za koncem stanoveného kritéria	za koncem stanoveného kritéria
Walter CNMG 120408-NRT		
SAFETY CNMG 120408-M5		
Sandvik CMNG 120408-SMR	za koncem stanoveného kritéria	za koncem stanoveného kritéria

Výsledky průběhu opotřebení VB_C (obr. 5.12) a stavu čel břitů (Tab. 5.18 a Tab. 5.19) spolu plně souvisí.

Při testech nejhůře dopadl opakovaně vzorek Walter - CNMG 120408-NRS, tvorba výmolu byla intenzivní. Pro zvolené kritérium opotřebení ($VB_C = 500 \mu\text{m}$) se trvanlivost VBD pohybovala okolo 9 minut.

Tab. 5.20 Walter - CNMG 120408-NRS opotřebení za koncem stanoveného kritéria

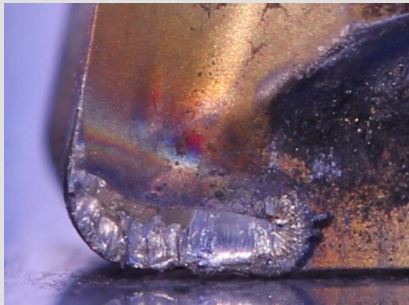
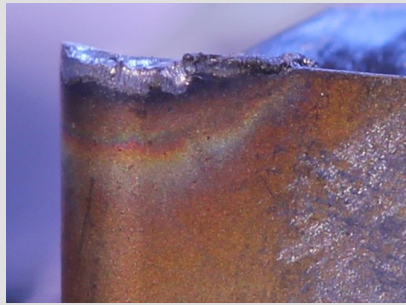
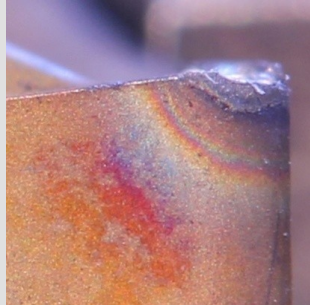
Walter – CNMG 120408-NRS		
Čelo VBD	Hřbet 1 VBD	Hřbet 2 VBD
		

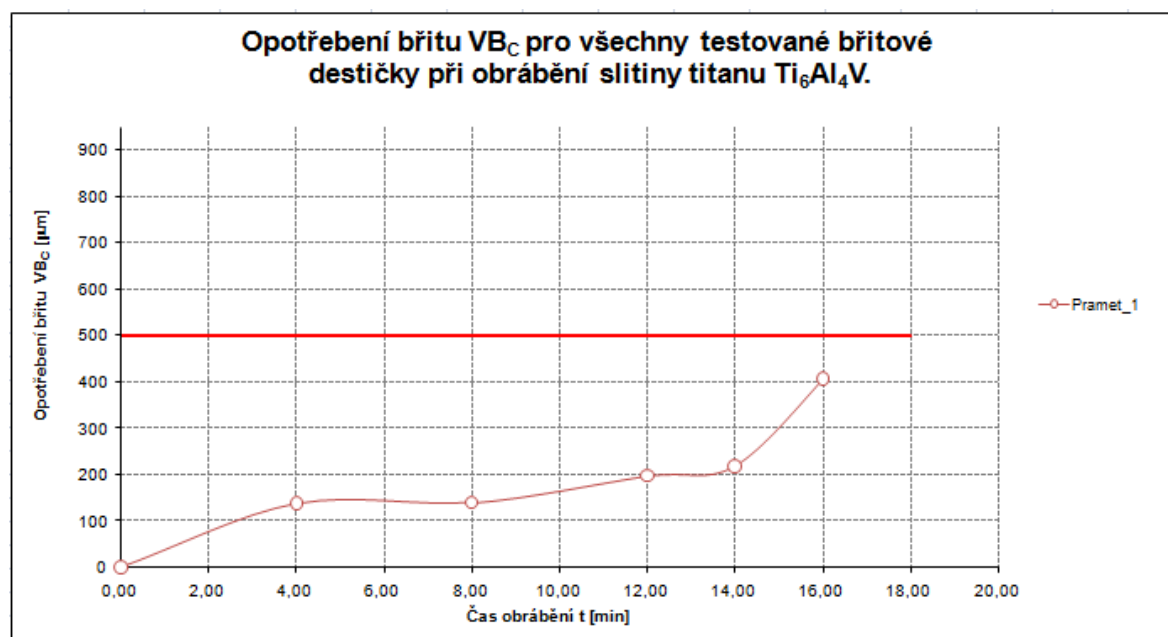


Obr. 5.18 Závislost průběhu opotřebení VB_C na době obrábění VBD při obrábění titanové slitiny Ti_6Al_4V

Nejlépe při testech dopadly vzorky Pramet - CNMG 120408-SM a SAFETY - CNMG 120408-M5. Trvanlivost bříty u těchto vyměnitelných břitových destiček za daných řezných podmínek přesáhla hodnotu 14 minut soustružení slitiny titanu. U těchto dvou typů VBD docházelo k pomalejšímu nárůstu výmolu na čele vyměnitelné břitové destičky. Příčinu těchto výsledků je třeba hledat v konkrétní kombinaci základního substrátu, povlaku a geometrie.

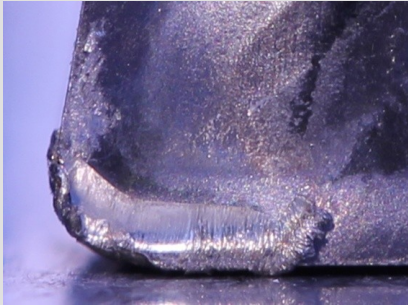

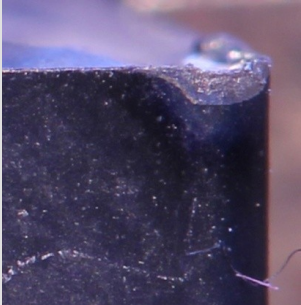
Tab. 5.21 Pramet - CNMG 120408-SM opotřebení za koncem stanoveného kritéria

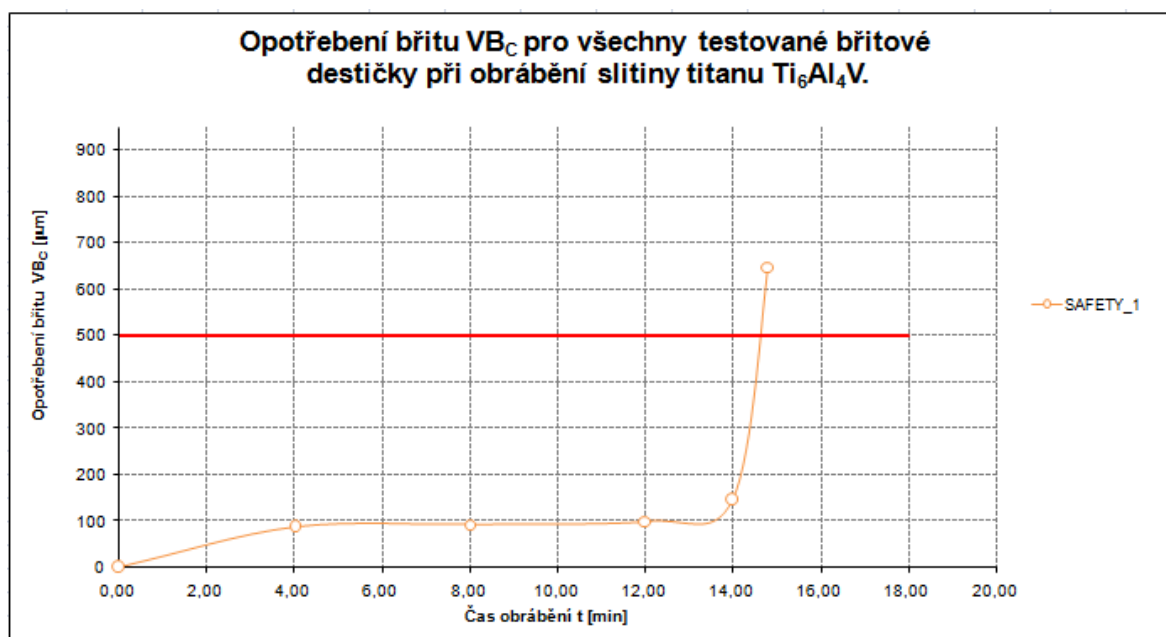
Pramet - CNMG 120408-SM		
Čelo VBD	Hřbet 1 VBD	Hřbet 2 VBD
		



Obr. 5.19 Závislost průběhu opotřebení VB_C na době obrábění VBD při obrábění titanové slitiny Ti_6Al_4V

Tab. 5.22 SAFETY - CNMG 120408-M5 opotřebení za koncem stanoveného kritéria

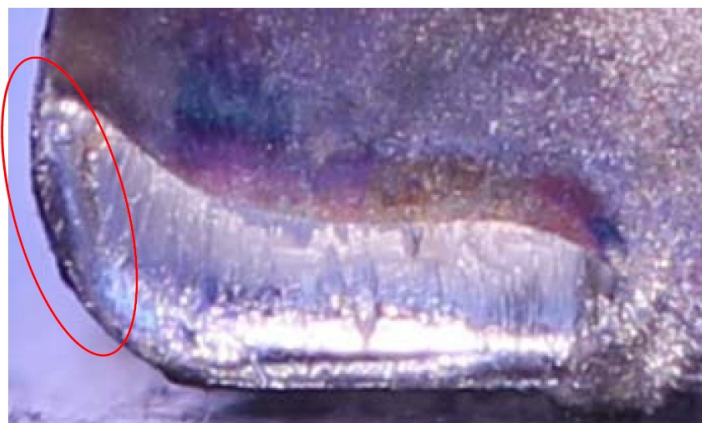
SAFETY - CNMG 120408-M5		
Čelo VBD	Hřbet 1 VBD	Hřbet 2 VBD
		

Obr. 5.20 Závislost průběhu opotřebení VB_C na době obrábění VBD při obrábění titanové slitiny Ti_6Al_4V

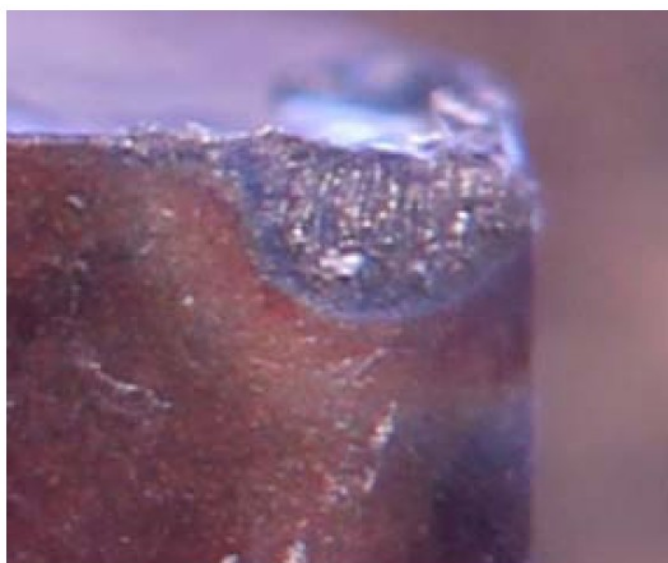
Trvanlivost VBD je za daných řezných podmínek v tomto testu úměrná odolnosti břitu nástroje proti působení vysokých teplot a odolnosti proti tvorbě výmolu na čele vyměnitelné břitové destičky. Negativní geometrie tak nemusí být u titanových slitin lepší cestou k delší trvanlivosti břitu, jelikož vede ke generování většího množství tepla.

Z pohledu hodnocení opotřebení vyměnitelných břitových destiček bylo zjištěno, že těsně před destrukcí řezné hrany (způsobené překročením únosnosti řezné hrany) dojde ke změně v utváření třísek. Do překročení této hranice se utváří krátká dělená tříska. Po překročení této hranice začne vznikat dlouhá spirálová tříska. V případě, kdy dojde k utváření této dlouhé spirálové třísky, dojde do několika desítek sekund k lavinové destrukci břitu. S ohledem na tento jev byly tedy některé testy zastaveny těsně před dosažením hodnoty kritéria opotřebení VBD.

Dalším činitelem, který vede k destrukci vyměnitelné břitové destičky je vzdálenost výmolu od vedlejšího ostří (obr. 5.21). V tomto místě dochází při kritické vzdálenosti a hloubce výmolu k obrovskému tepelnému a silovému zatížení vzniklého „můstku“ (mezi vedlejším ostřím VBD a výmolem na čele), které vede ke zborcení tohoto můstku. Zborcení daného můstku (obr. 5.22) vede k následnému lavinovitému opotřebení vyměnitelné břitové destičky.



Obr. 5.21 Ukázka vzdálenosti výmolu na čele a vedlejšího ostří



Obr. 5.22 Ukázka zborcení vedlejšího ostří vyměnitelné břitové destičky

5.7 Měření opotřebení VBD při soustružení slitiny niklu Inconel 718

U experimentálního měření opotřebení se provádělo dvojí měření řezného vzorku. Pro první měření byl odebíraný materiál za 1 přejezd $52,5 \text{ cm}^3$ a posuv na otáčku byl $0,25 \text{ mm}$. U druhého měření byl odebraný materiál za 1 přejezd $52,5 \text{ cm}^3$ a posuv na otáčku byl $0,25 \text{ mm}$. Kritériem pro ukončení testů bylo zvoleno opotřebení na hřbetě $500 \text{ }\mu\text{m}$. Použité řezné podmínky pro testy trvanlivosti VBD při obrábění slitiny niklu Inconel 718 byly následující:

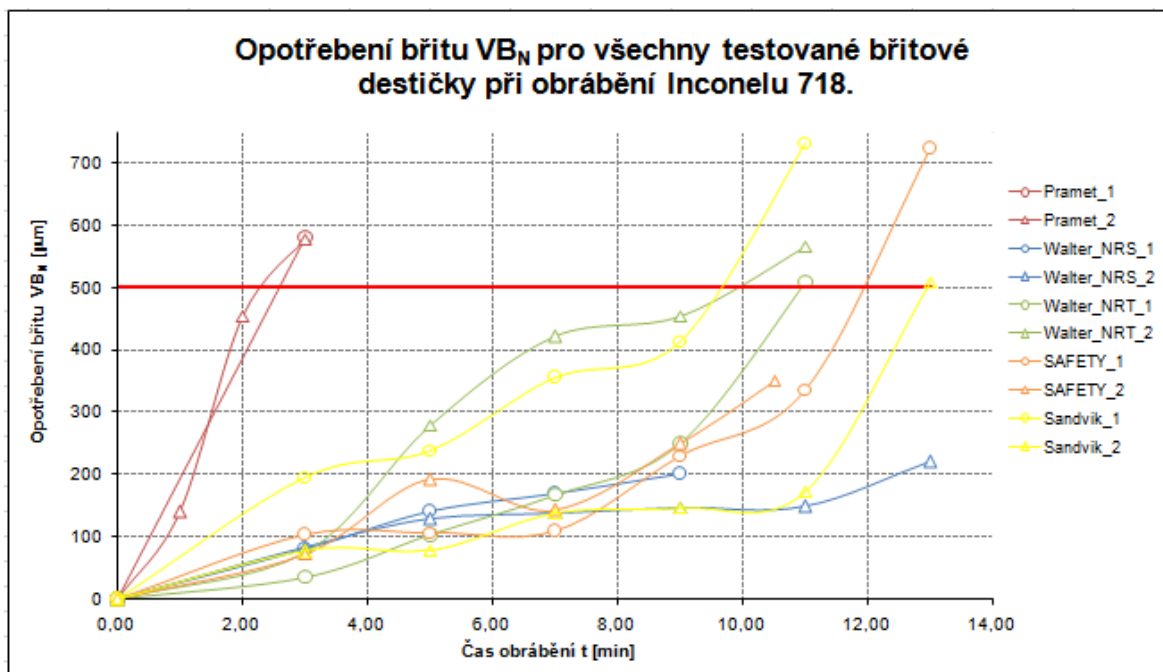
Tab. 5.23 Řezné podmínky

Řezná rychlost	v_c	[m/min]	35
Posuv na otáčku	f_n	[mm]	0,25
Axiální hloubka řezu	a_p	[mm]	2

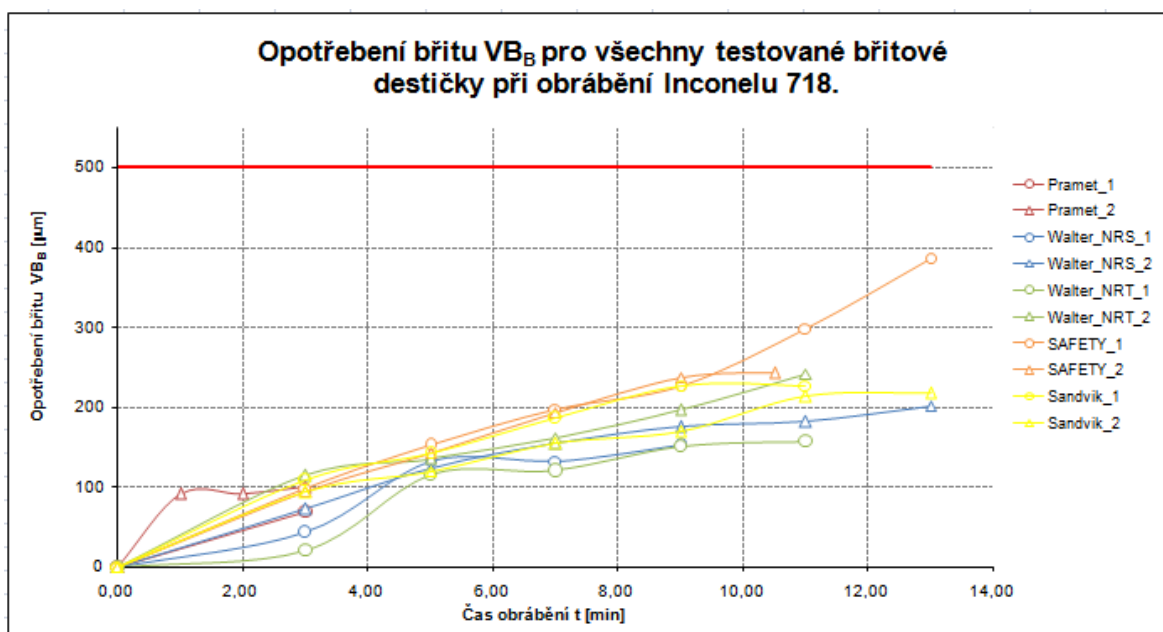
Z pohledu velmi špatné tepelné vodivosti a vysoké tvrdosti slitiny niklu Inconel 718 vznikají při soustružení vysoké teploty. Vysoká pevnost, mechanické zpevňování obrobeného povrchu a adheze jsou důvodem vzniku opotřebení ve tvaru vrubu na úrovni maximální hloubky řezu (VB_N). Kombinace všech těchto faktorů společně tvoří extrémně abrazivní prostředí pro břit, jenž vede k rychlému opotřebení vyměnitelné břitové destičky.

Z průběhu a výsledků testů je patrné, že kritickým faktorem pro trvanlivost břitu vyměnitelných břitových destiček je jednoznačně odolnost proti opotřebení na hřbetu VB_N a velikost kráteru na čele VBD. Jak již bylo řečeno opotřebení v oblasti maximální hloubky řezu na hřbetu VB_N je zapříčiněno obráběním zpevněné povrchové vrstvy, která je typická u obrábění této slitiny niklu. Na konci trvanlivosti břitu VBD docházelo k lavinovitému opotřebení na řezné hraně v místě maximální hloubky řezu $a_p = 2 \text{ mm}$ a žlábků na čele (utvařeči) břitu.

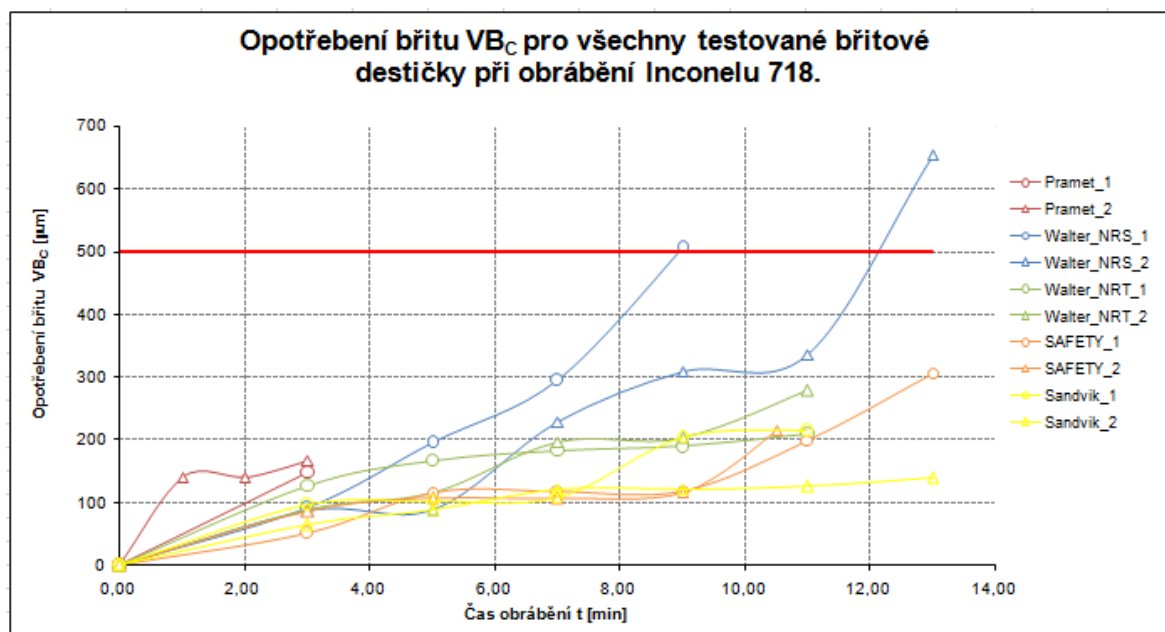
Účinky průběhu opotřebení VB_N (obr. 5.23) a stavu čel břitů (tab. 5.24 a tab. 5.25) jasně ukazují na rozdíly mezi jednotlivými VBD.



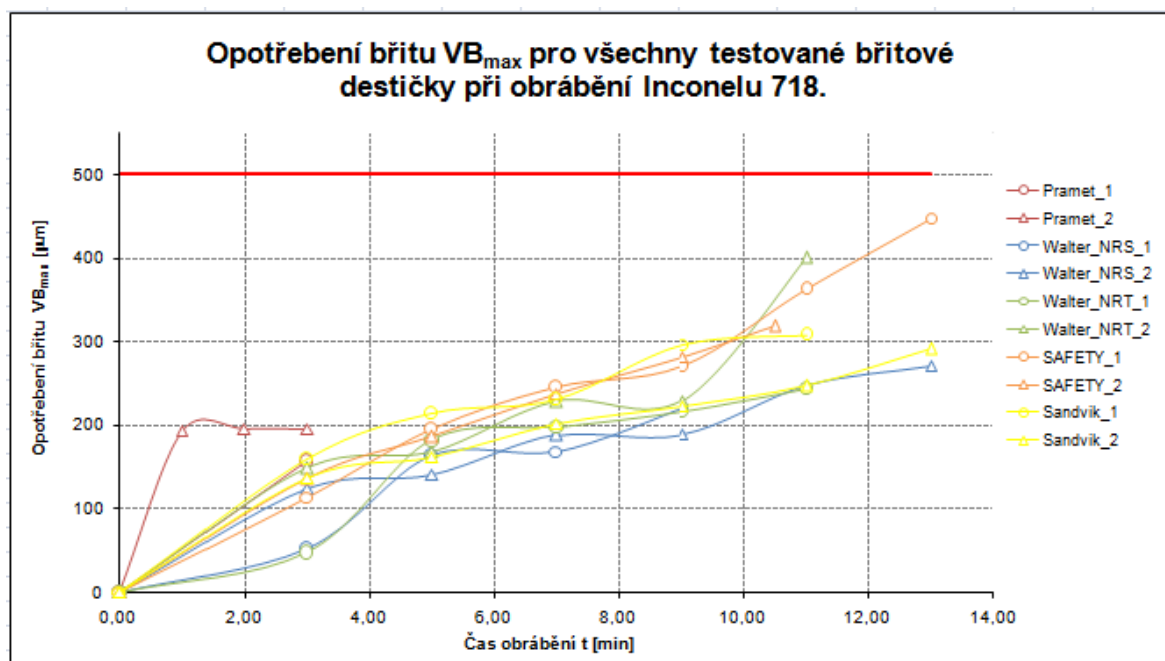
Obr. 5.23 Závislosti průběhu opotřebení VB_N na době obrábění pro všechny použité VBD při obrábění slitiny niklu Inconel 718 a opakované měření



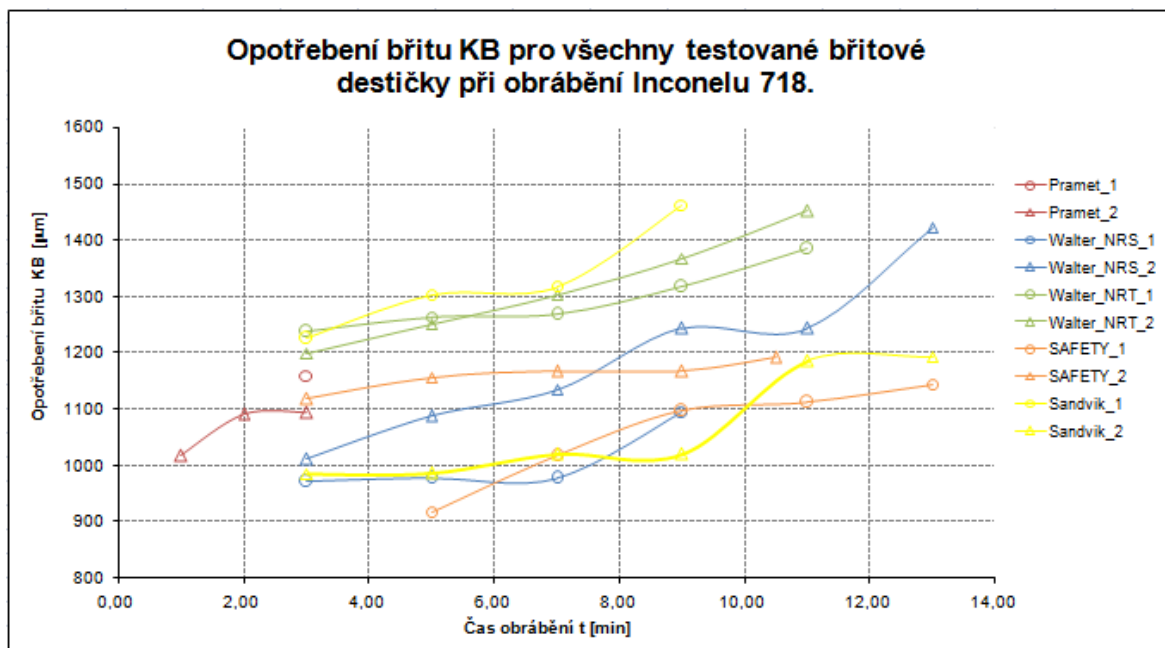
Obr. 5.24 Závislosti průběhu opotřebení VB_B na době obrábění pro všechny použité VBD při obrábění slitiny niklu Inconel 718 a opakované měření



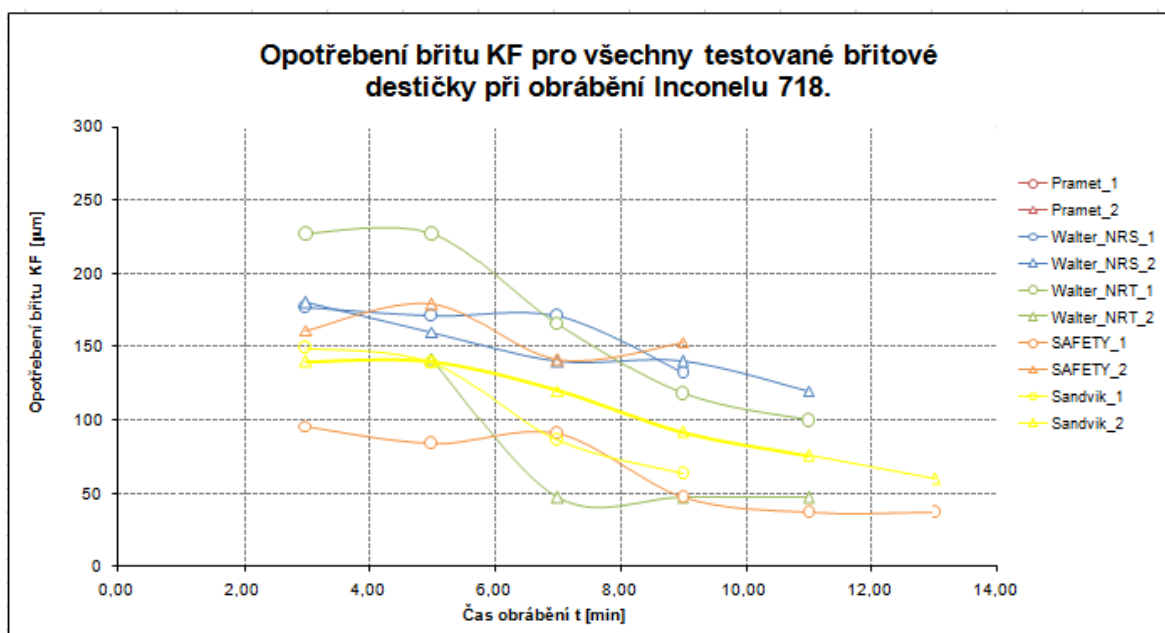
Obr. 5.25 Závislosti průběhu opotřebení VB_C na době obrábění pro všechny použité VBD při obrábění slitiny niklu Inconel 718 a opakované měření



Obr. 5.26 Závislosti průběhu opotřebení VB_{max} na době obrábění pro všechny použité VBD při obrábění slitiny niklu Inconel 718 a opakované měření

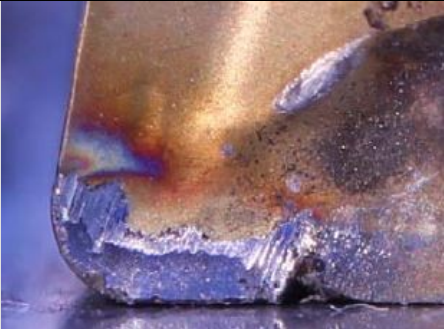
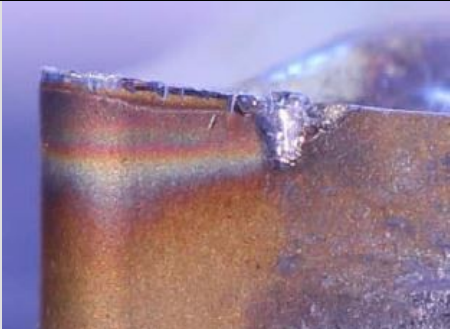




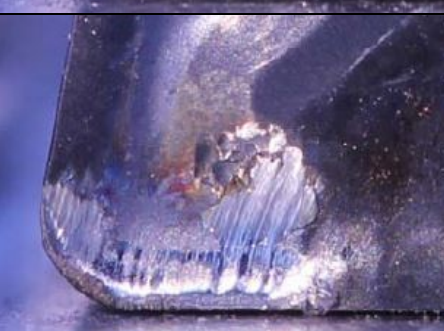


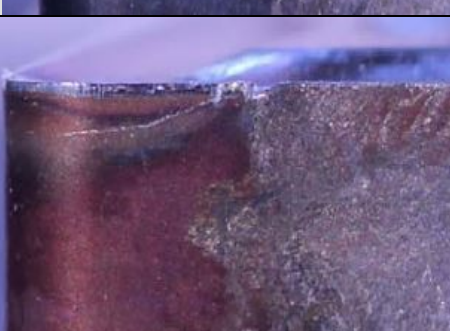


Obr. 5.27 Závislosti průběhu opotřebení KB na době obrábění pro všechny použité VBD při obrábění slitiny niklu Inconel 718 a opakované měření


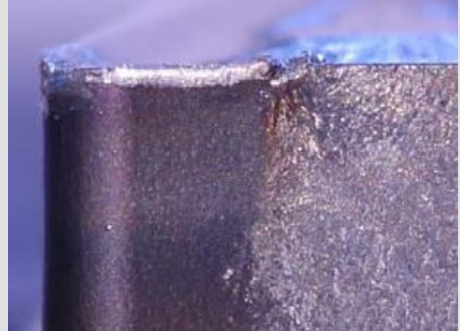

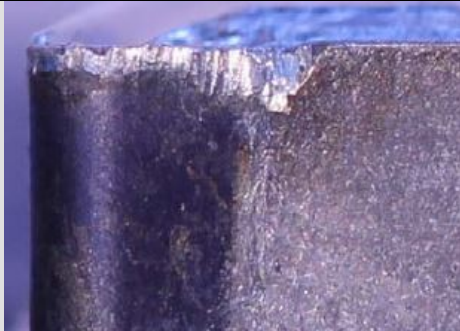



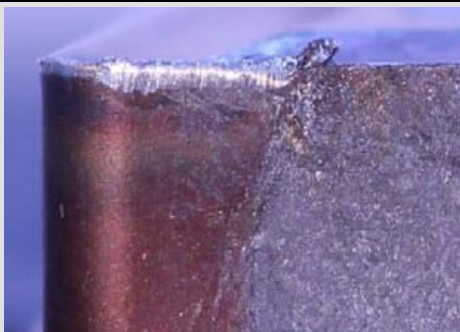


Obr. 5.28 Závislosti průběhu opotřebení KF na době obrábění pro všechny použité VBD při obrábění slitiny niklu Inconel 718 a opakované měření

Tab. 5.24 Snímky stavu břitu VBD po 3 minutách soustružení slitiny niklu Inconel 718

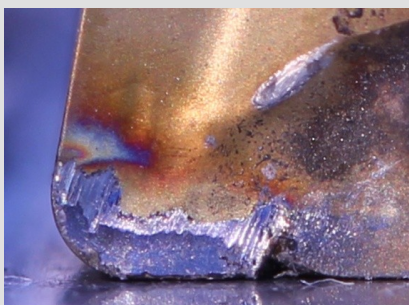
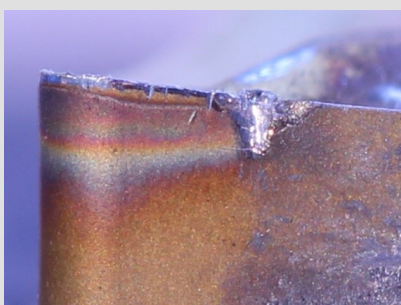

Opotřebení VBD po 3 minutách soustružení niklové slitiny Inconel 718			
Pramet CNMG 120408-SM			
Walter CNMG 120408-NRS			
Walter CNMG 120408-NRT			
SAFETY CNMG 120408-M5			
Sandvik CMNG 120408-SMR			

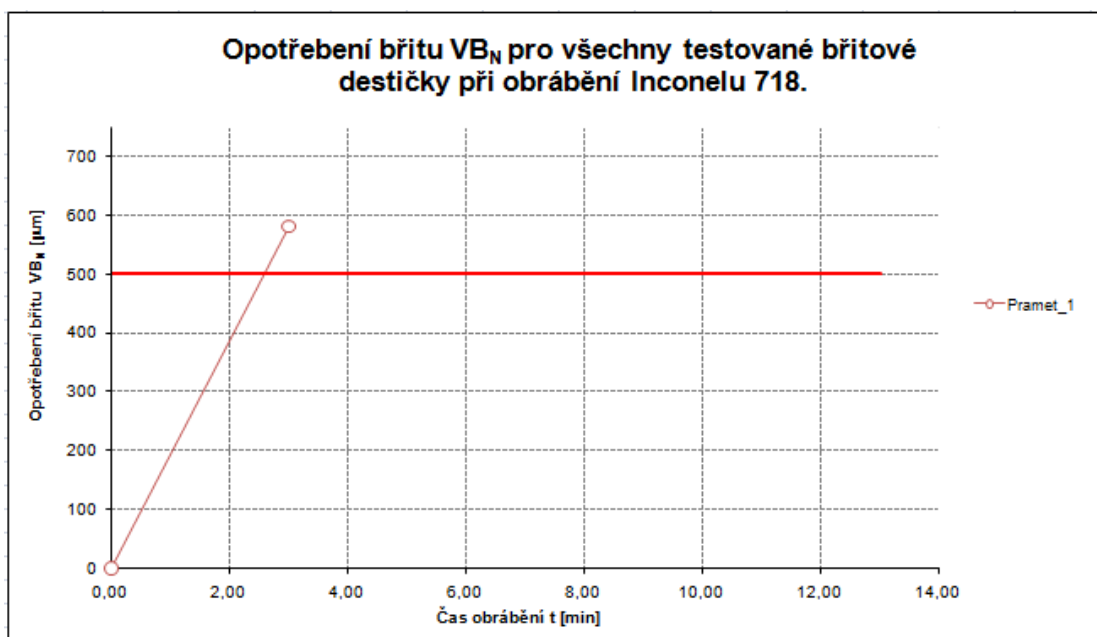
Tab. 5.25 Snímky stavu bříty VBD po 11 minutách soustružení slitiny niklu Inconel 718

Opotřebení VBD po 11 minutách soustružení niklové slitiny Inconel 718		
Pramet CNMG 120408-SM	za koncem stanoveného kritéria	za koncem stanoveného kritéria
Walter CNMG 120408-NRS		
Walter CNMG 120408-NRT		
SAFETY CNMG 120408-M5		
Sandvik CMNG 120408-SMR		

Při testech nejhůře dopadl opakovaně vzorek Pramet - CNMG 120408-SM, tvorba opotřebení ve formě vrubu byla velice intenzivní a pro zvolené kritérium opotřebení ($VB_N = 500 \mu\text{m}$) se trvanlivost břitu pohybovala okolo 3 minut. Vyměnitelná břitová destička Pramet - CNMG 120408-SM není vhodná díky své geometrii a použitým materiálům (základní substrát a povlak) pro soustružení slitiny Inconel 718. Omezením tvorby vrubu by se pro daný typ VBD mohlo vyřešit snížením řezné rychlosti, popřípadě otěruvzdornějším typem základního substrátu slinutého karbidu a to vždy v kombinaci s vhodnou geometrií. Pro tento typ obrábění slitiny může být zvolená geometrie VBD Pramet - CNMG 120408-SM příliš pozitivní.

Tab. 5.26 Pramet - CNMG 120408-SM opotřebení za koncem stanoveného kritéria

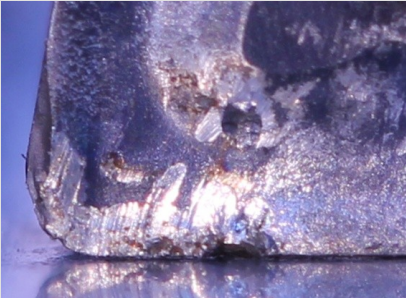
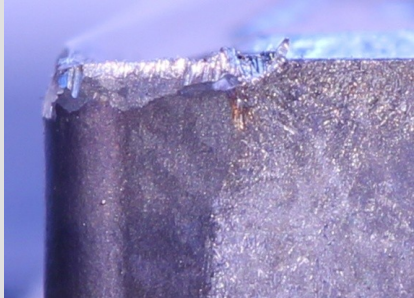

Pramet - CNMG 120408-SM		
Čelo VBD	Hřbet 1 VBD	Hřbet 2 VBD
		

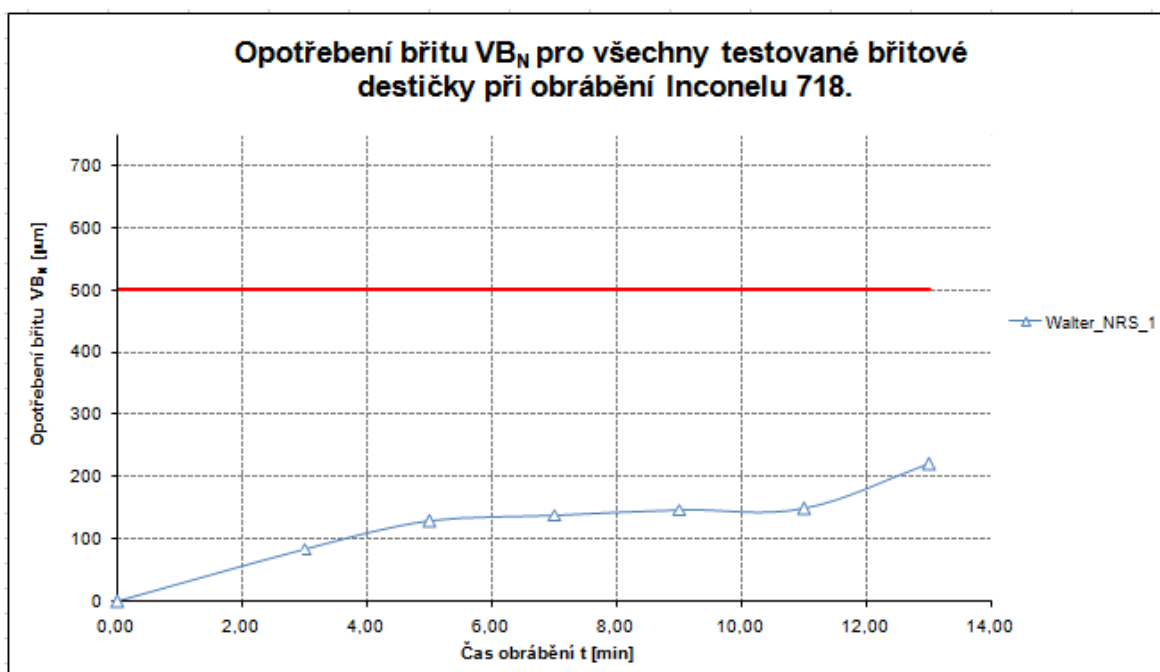


Obr. 5.29 Závislosti průběhu opotřebení VB_N na době obrábění pro VBD při obrábění slitiny niklu Inconel 718

Nejlépe dopadly vyměnitelné břitové destičky: Walter - CNMG 120408-NRS, SAFETY - CNMG 120408-M5 a Sandvik - CNMG 120408-SMR. Trvanlivost břitu se u těchto VBD za daných řezných podmínek pohybovala kolem 13 minut. Rozdíl byl ale v typu opotřebení. Zatímco u vyměnitelné břitové destičky SAFETY - CNMG 120408-M5 a Sandvik - CNMG 120408-SMR bylo dominantní opotřebení na hřbetě v oblasti maximální hloubky řezu (VB_N). U destičky Walter - CNMG 120408-NRS docházelo k lavinovitému opotřebení hřbetu na rádiu řezné hrany (VB_C). Tento rozdíl je zapříčiněn odlišnou kombinací základního substrátu a povlaku.

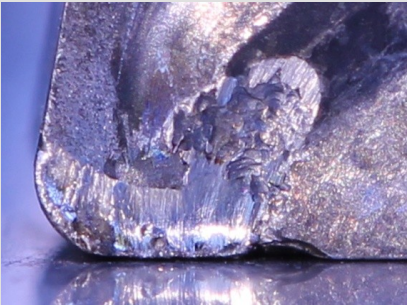
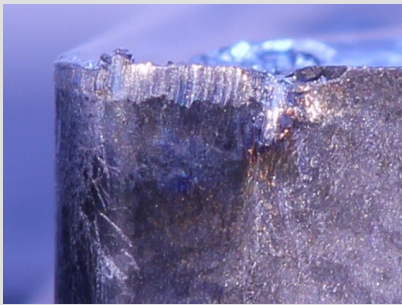

Tab. 5.27 Walter - CNMG 120408-NRS opotřebení za koncem stanoveného kritéria

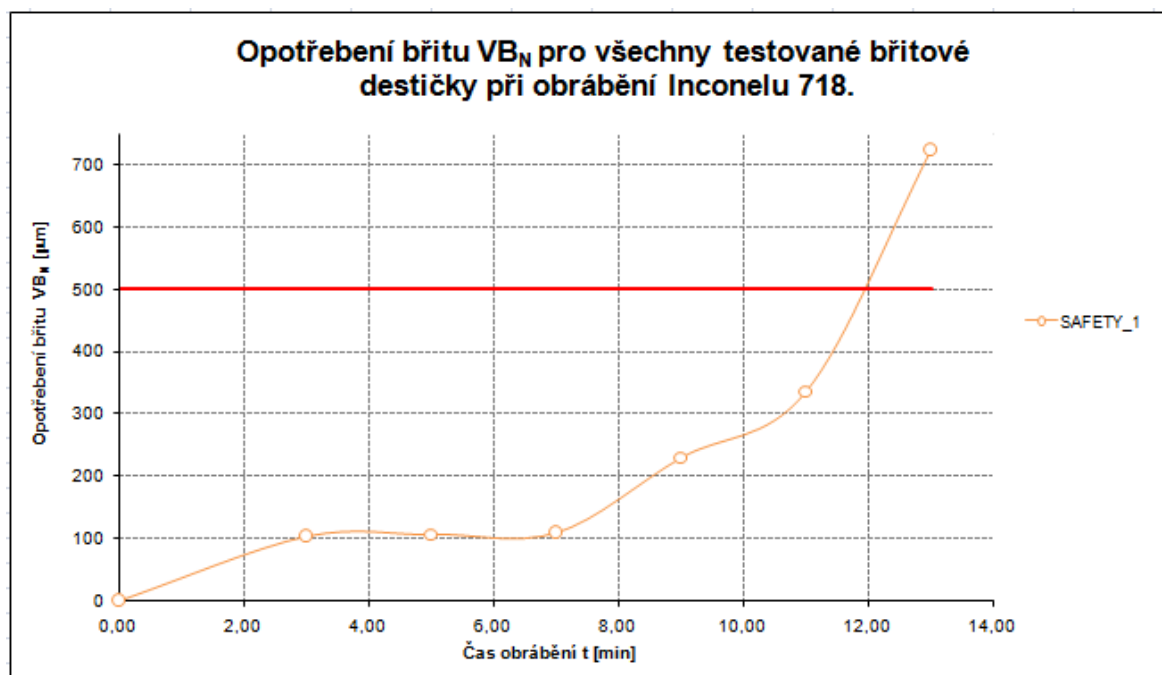
Walter – CNMG 120408-NRS		
Čelo VBD	Hřbet 1 VBD	Hřbet 2 VBD
		



Obr. 5.30 Závislosti průběhu opotřebení VB_N na době obrábění pro VBD při obrábění slitiny niklu Inconel 718

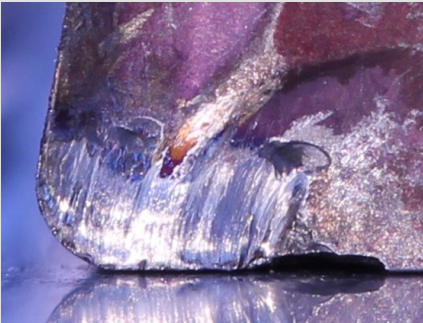
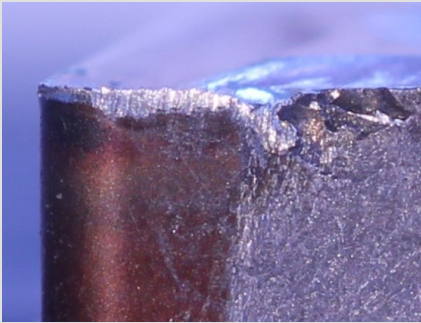
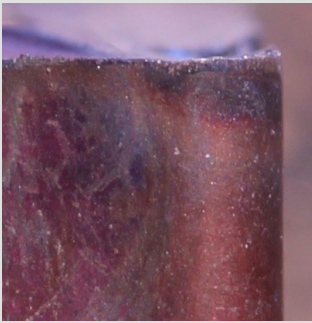
Tab. 5.28 SAFETY - CNMG 120408-M5 opotřebení za koncem stanoveného kritéria

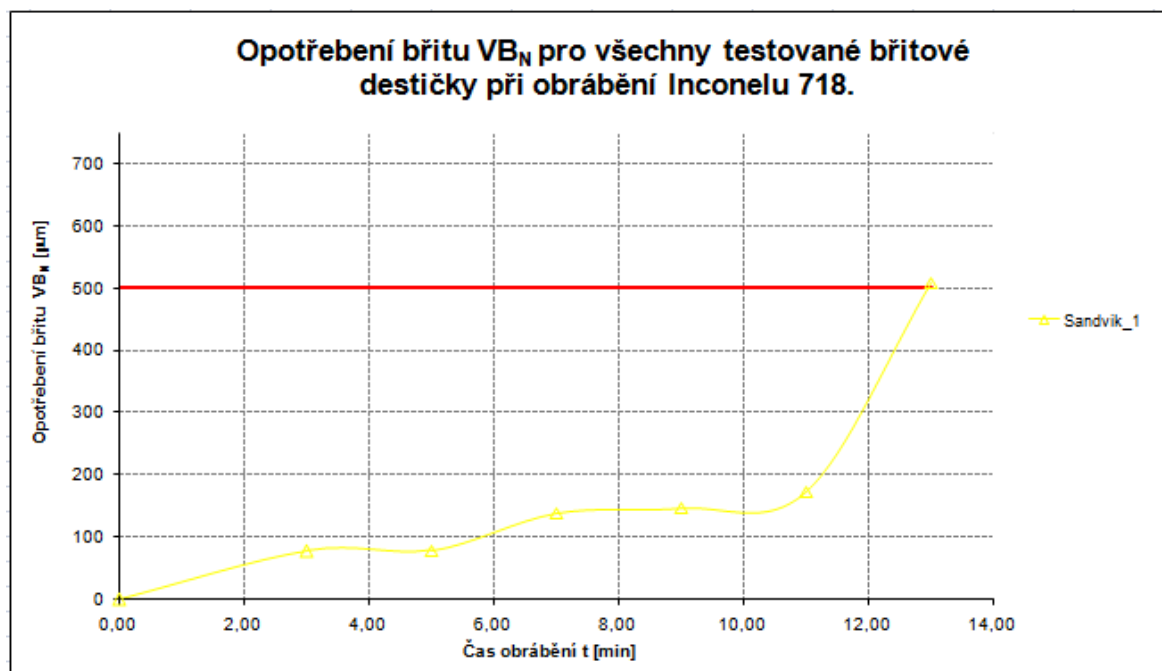
SAFETY - CNMG 120408-M5		
Čelo VBD	Hřbet 1 VBD	Hřbet 2 VBD
		



Obr. 5.31 Závislosti průběhu opotřebení VB_N na době obrábění pro VBD při obrábění slitiny niklu Inconel 718

Tab. 5.29 Sandvik - CNMG 120408-SMR opotřebení za koncem stanoveného kritéria

Sandvik – CNMG 120408-SMR		
Čelo VBD	Hřbet 1 VBD	Hřbet 2 VBD
		

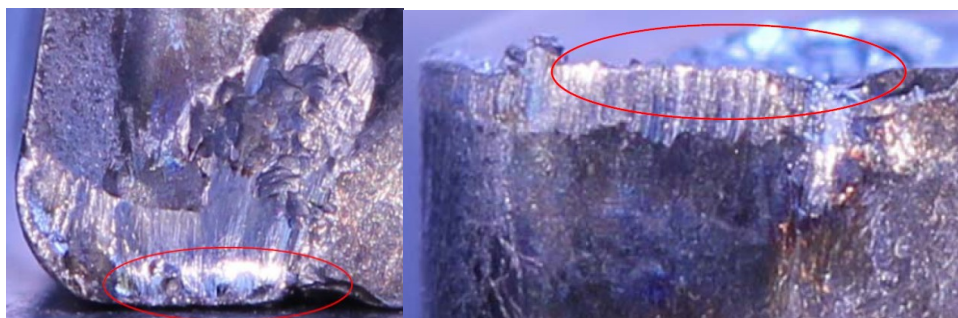


Obr. 5.32 Závislosti průběhu opotřebení VB_N na době obrábění pro VBD při obrábění slitiny niklu Inconel 718

Při pohledu na všechny vzorky je patrné, že geometrie použitá na vzorcích firmy Walter CZ, s.r.o. a SAFETY s.r.o. je méně pozitivní, než u VBD firmy Pramet Tools, s.r.o. Z daného důvodu je třeba se zaměřit na použitou geometrii břitu VBD pro obrábění této těžkoobrobitelné slitiny.

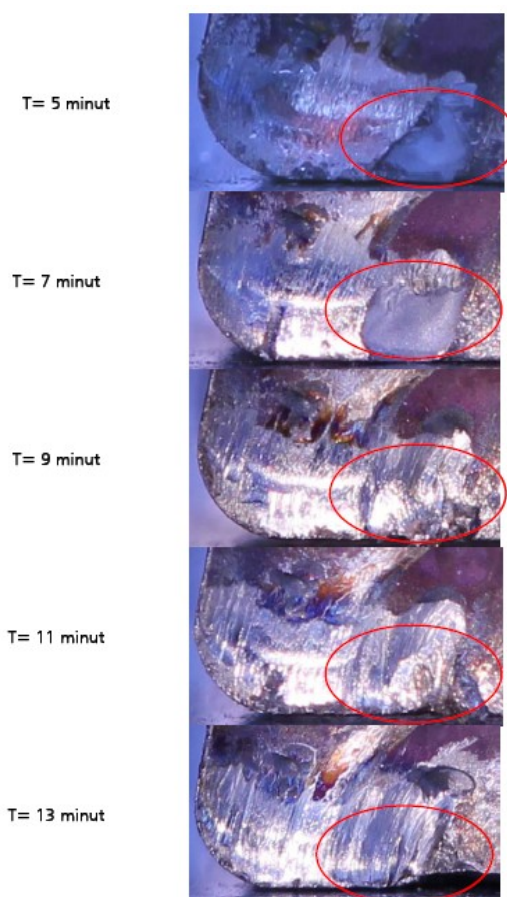
Faktor, který vede k destrukci VBD je vzdálenost a hloubka výmolu od opotřebení na hřbetě VBD (obr. 5.33).

V oblasti největšího opotřebení na hřbetě dochází při kritické vzdálenosti opotřebení VB_N a vrubu na čele k velkému tepelnému a silovému zatížení vzniklého „můstku“, jenž vede k intenzivnímu opotřebení v oblasti maximální hloubky řezu VB_N (obr. 5.33).



Obr. 5.33 Ukázka vzdálenosti opotřebení na hřbetě a vrubu na čele VBD

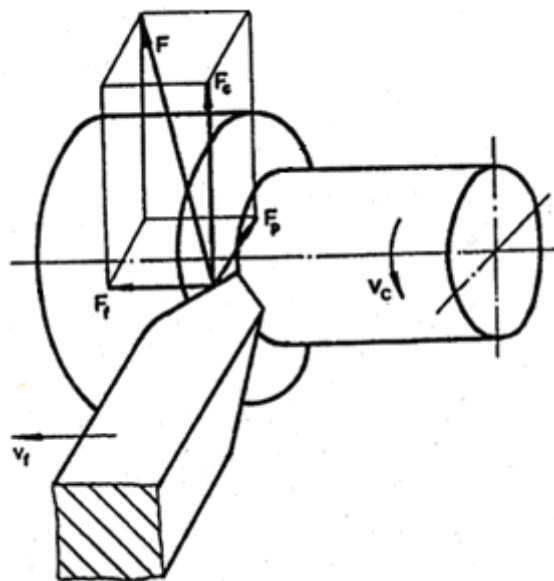
Na opotřebení VBD Sandvik - CNMG 120408-SMR je dobře viditelné, jak důležitá je hloubka vrubu na čele VBD. Na obr. 5.34 je znatelné, že po 5 minutách soustružení došlo k rozsáhlému vyštípnutí ostří na čele VBD. Toto vyštípnutí mělo ale spíše plošný charakter (malá hloubka vyštípnutí), při kterém se výrazně nezměnila geometrie břitu VBD. Při tomto typu opotřebení byla vyměnitelná břitová destička schopná dále obrábět ještě 8 minut. Na obr. 5.34 je zaznamenáno opotřebení čela VBD v průběhu obrábění.



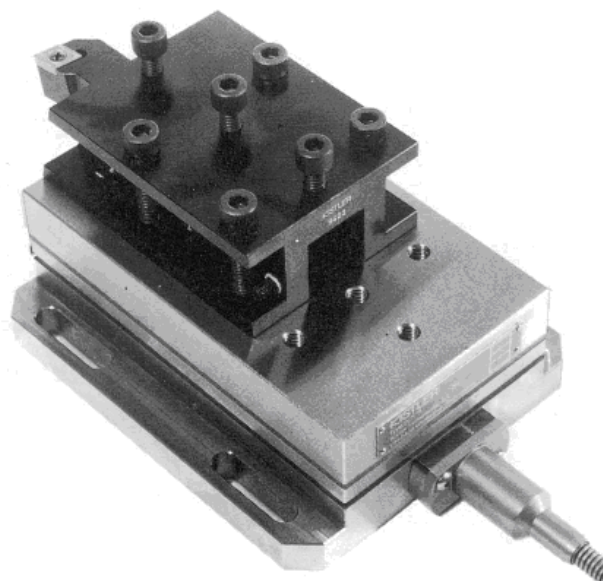
Obr. 5.34 Ukázka vyštípnutí ostří na čele VBD Sandvik - CNMG 120408-SMR

5.8 Měření složek řezné síly při obrábění

Pro měření složek řezné síly při obrábění byl použit třísložkový dynamometr pro soustružení KISTLER 9257B (viz. obr. 5.36) a k tomu příslušná měřicí soustava. Dynamometr měří 3 složky řezné síly v souřadném systému. Na obrázku jsou znázorněny působící složky silového zatížení: řezná síla F_c , pasivní síla F_p a posuvová síla F_f . Výsledná síla soustružení F je výslednice těchto tří sil. [19]



Obr. 5.35 Směry působení řezných sil [19]



Obr. 5.36 Dynamometr KISTLER 9257B [36]

5.9 Hodnocení silového zatížení v závislosti na opotřebení VBD při soustružení slitiny titanu Ti_6Al_4V

Pro experimenty silového zatížení vyměnitelné břitové destičky při soustružení slitiny titanu Ti_6Al_4V byly užity tři kombinace řezných podmínek. Tyto podmínky jsou zobrazeny v následujících tabulkách:

Tab. 5.30 Řezné podmínky pro první měření

Řezná rychlost	v_c	m/min	44
Posuv na otáčku	f_n	mm	0,2
Hloubka řezu	a_p	mm	1

Tab. 5.31 Řezné podmínky pro druhé měření

Řezná rychlost	v_c	m/min	44
Posuv na otáčku	f_n	mm	0,25
Hloubka řezu	a_p	mm	2

Tab. 5.32 Řezné podmínky pro třetí měření

Řezná rychlost	v_c	m/min	44
Posuv na otáčku	f_n	mm	0,4
Hloubka řezu	a_p	mm	3

Pomocí třísložkového dynamometru KISTLER 9257B a příslušné měřicí soustavy bylo naměřeno působení silového zatížení na každou vyměnitelnou břitovou destičku. Naměřené hodnoty byly zadány do tabulky v programu Excel, kde byly jednotlivé zatěžující síly vyhodnoceny pomocí grafů. V následujících tabulkách jsou zaznamenány naměřené parametry působení zatěžujících sil na jednotlivé VBD.

Pramet - CNMG 120408-SM

Pro první měření byla použita vyměnitelná břitová destička Pramet - CNMG 120408-SM.

Tab. 5.33 Naměřené zatěžující síly na řezný nástroj Pramet

Naměřené pasivní síly F_p [N]				Naměřené posuvové síly F_f [N]				Naměřené řezné síly F_c [N]			
1	2	3	Ø	1	2	3	Ø	1	2	3	Ø
149	152	152	151	143	145	145	144	326	328	323	326
150	150	149	150	361	371	371	368	829	831	824	828
188	186	181	185	578	571	568	572	1629	1635	1638	1634

Walter - CNMG 120408-NRS

Pro druhé měření byla použita vyměnitelná břitová destička Walter - CNMG 120408-NRS.

Tab. 5.34 Naměřené zatěžující síly na řezný nástroj Walter

Naměřené pasivní síly F_p [N]				Naměřené posuvové síly F_f [N]				Naměřené řezné síly F_c [N]			
1	2	3	Ø	1	2	3	Ø	1	2	3	Ø
143	144	144	144	134	135	136	135	319	321	323	321
189	184	184	186	334	330	331	332	779	782	778	780
294	295	293	294	546	555	559	553	1537	1554	1528	1540

Walter - CNMG 120408E-NRT

Pro třetí měření byla použita vyměnitelná břitová destička Walter - CNMG 120408E-NRT.

Tab. 5.35 Naměřené zatěžující síly na řezný nástroj Walter

Naměřené pasivní síly F_p [N]				Naměřené posuvové síly F_f [N]				Naměřené řezné síly F_c [N]			
1	2	3	Ø	1	2	3	Ø	1	2	3	Ø
201	204	204	203	202	205	205	204	357	360	361	359
236	234	230	233	484	478	478	480	862	855	857	858
356	355	357	356	802	801	810	804	1675	1653	1667	1665

SAFETY - CNMG 120408-M5

Pro čtvrté měření byla použita vyměnitelná břitová destička SAFETY - CNMG 120408-M5.

Tab. 5.36 Naměřené zatěžující síly na řezný nástroj SAFETY

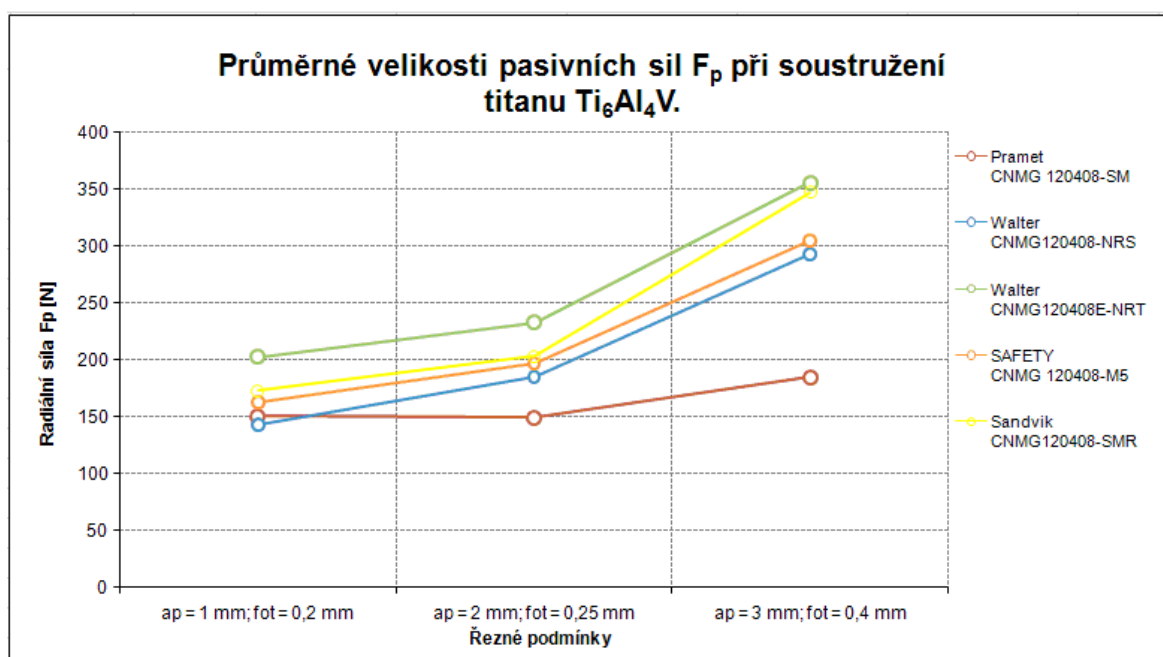
Naměřené pasivní síly F_p [N]				Naměřené posuvové síly F_f [N]				Naměřené řezné síly F_c [N]			
1	2	3	Ø	1	2	3	Ø	1	2	3	Ø
163	162	163	163	170	171	172	171	339	335	336	337
197	195	197	196	411	404	402	406	829	834	836	833
304	306	304	305	671	668	664	668	1647	1654	1651	1651

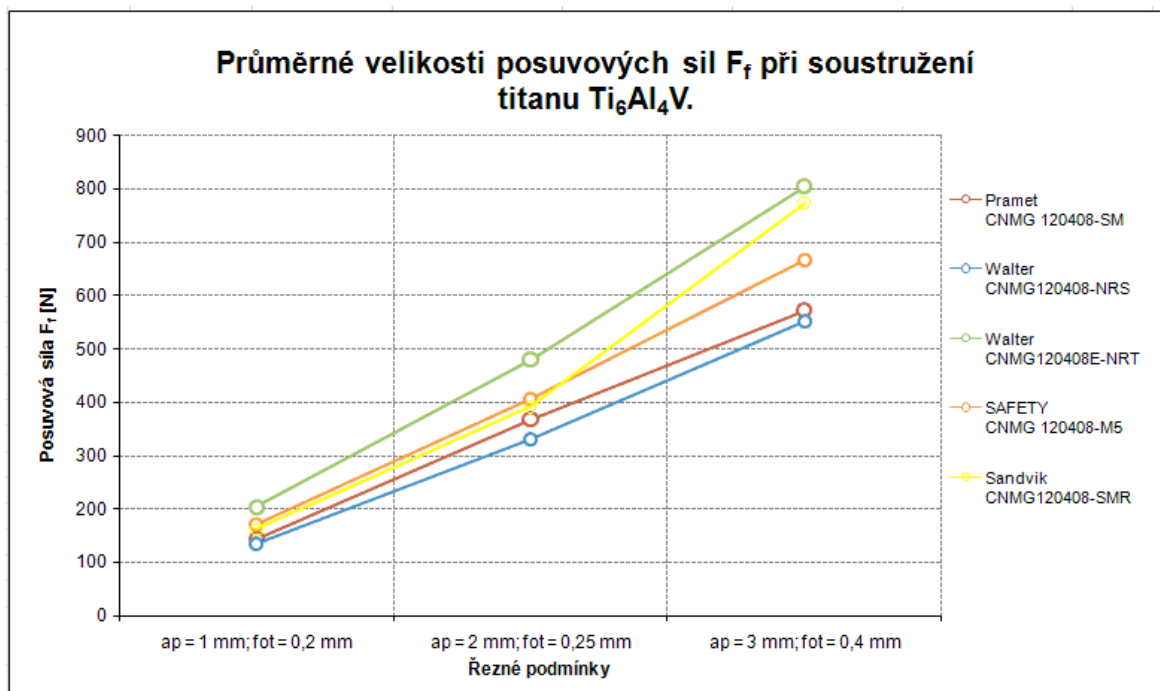
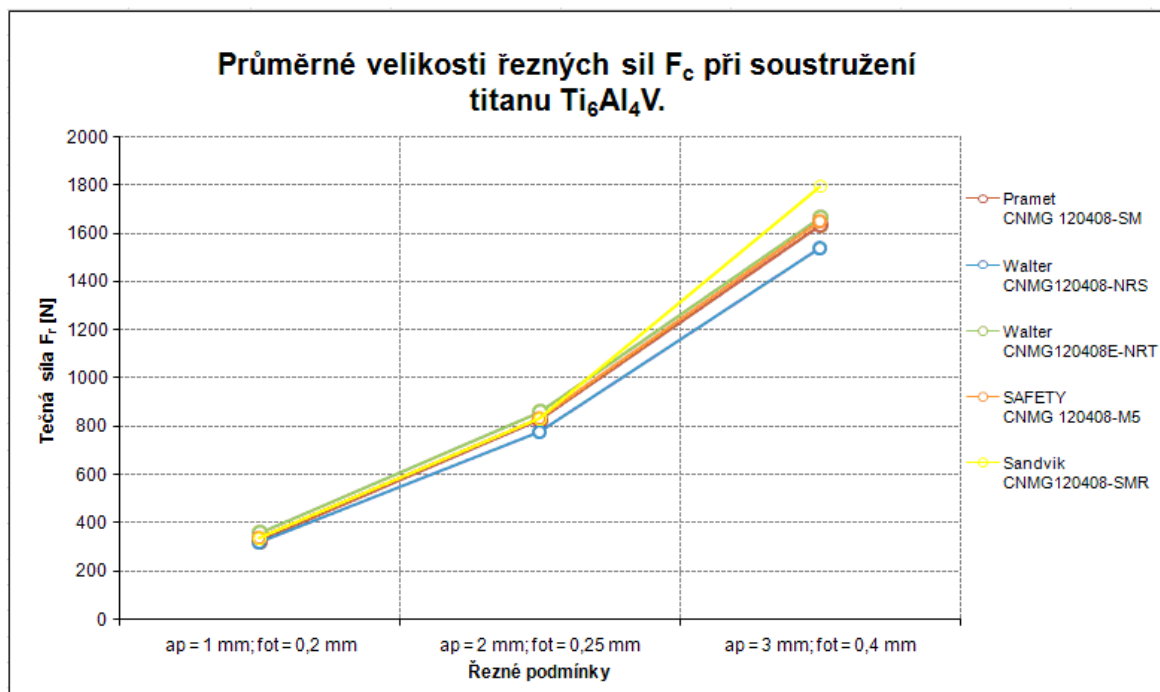
Sandvik - CNMG 120408-SMR

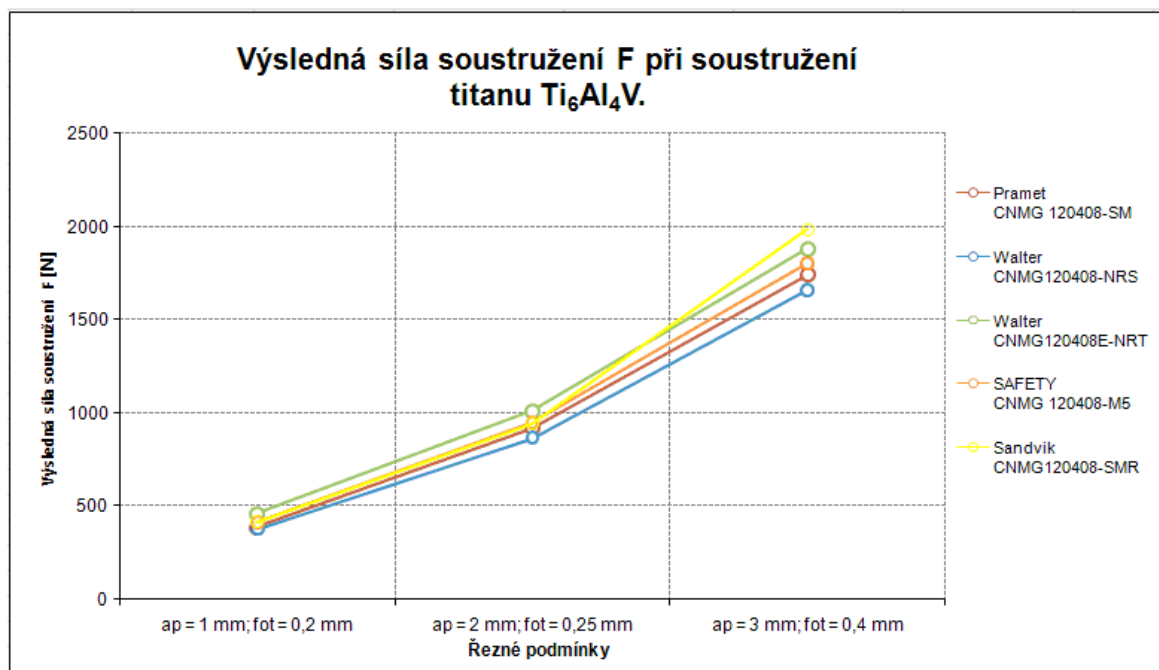
Pro páté měření byla použita vyměnitelná břitová destička Sandvik - CNMG 120408-SMR.

Tab. 5.37 Naměřené zatěžující síly na řezný nástroj Sandvik

Naměřené pasivní síly F_p [N]				Naměřené posuvové síly F_f [N]				Naměřené řezné síly F_c [N]			
1	2	3	Ø	1	2	3	Ø	1	2	3	Ø
168	176	176	173	159	163	164	162	333	341	340	338
204	203	203	203	392	387	394	391	831	829	839	833
341	351	351	348	770	771	782	774	1785	1792	1808	1795

Obr. 5.37 Průměrná velikost pasivních sil F_p

Obr. 5.38 Průměrná velikost posuvových sil F_f Obr. 5.39 Průměrná velikost řezných sil F_c

Obr. 5.40 Výsledná síla soustružení F

Z výsledných grafů silového zatížení řezného nástroje při soustružení slitiny titanu Ti_6Al_4V a procentuelních porovnáních jsou zřejmé následující závěry:

- Zvětšujícím se opotřebením vyměnitelné břitové destičky se zvyšuje řezný odpor.
- Nejmenší podíl na výsledné síle soustružení F má pasivní síla F_p , její procentuelní podíl se průměrně pohybuje kolem 8 %, po ní následuje posuvová síla F_f s 16%. Největší podíl má řezná síla F_c , její podíl na F je průměrně kolem 76%.
- Velmi malé silové zatížení bylo naměřeno u VBD Walter – NRS a největší silové zatížení bylo naměřeno u vyměnitelné břitové destičky Walter – NRT a Sandviku. Rozdíl u výsledné síly soustružení F byl mezi těmito řeznými nástroji při největších řezných podmínkách ($a_p = 3 \text{ mm}$ a $f_n = 0,4 \text{ mm}$) až 19 % a to je velikost 329 N.

5.10 Hodnocení silového zatížení v závislosti na opotřebení VBD při soustružení slitiny niklu Inconel 718

Pro experimenty silového zatížení vyměnitelné břitové destičky při soustružení slitiny niklu Inconel 718 byly užity tři kombinace řezných podmínek. Tyto podmínky jsou zobrazeny v následujících tabulkách:

Tab. 5.38 Řezné podmínky pro první měření

Řezná rychlost	v_c	m/min	34
Posuv na otáčku	f_n	mm	0,2
Hloubka řezu	a_p	mm	1

Tab. 5.39 Řezné podmínky pro druhé měření

Řezná rychlost	v_c	m/min	34
Posuv na otáčku	f_n	mm	0,25
Hloubka řezu	a_p	mm	2

Tab. 5.40 Řezné podmínky pro třetí měření

Řezná rychlost	v_c	m/min	34
Posuv na otáčku	f_n	mm	0,4
Hloubka řezu	a_p	mm	3

Pomocí třísložkového dynamometru KISTLER 9257B a příslušné měřicí soustavy bylo naměřeno působení silového zatížení na každou vyměnitelnou břitovou destičku. Naměřené hodnoty byly zadány do tabulky v programu Excel, kde byly jednotlivé zatěžující síly vyhodnoceny pomocí grafů. V následujících tabulkách jsou zaznamenány naměřené parametry působení zatěžujících sil na jednotlivé VBD.

Pramet - CNMG 120408-SM

Pro první měření byla použita vyměnitelná břitová destička Pramet - CNMG 120408-SM.

Tab. 5.41 Naměřené zatěžující síly na řezný nástroj Pramet

Naměřené pasivní síly F_p [N]				Naměřené posuvové síly F_f [N]				Naměřené řezné síly F_c [N]			
1	2	3	Ø	1	2	3	Ø	1	2	3	Ø
255	249	249	251	356	361	366	361	665	664	655	661
234	239	250	241	745	767	777	763	1396	1420	1437	1418
397	402	415	405	1358	1378	1415	1384	3043	3103	3138	3095

Walter - CNMG 120408-NRS

Pro druhé měření byla použita vyměnitelná břitová destička Walter - CNMG 120408-NRS.

Tab. 5.42 Naměřené zatěžující síly na řezný nástroj Walter

Naměřené pasivní síly F_p [N]				Naměřené posuvové síly F_f [N]				Naměřené řezné síly F_c [N]			
1	2	3	Ø	1	2	3	Ø	1	2	3	Ø
246	252	257	252	313	320	332	322	641	648	662	650
318	318	332	323	633	631	654	639	1325	1324	1380	1343
671	700	754	708	1457	1461	1436	1451	3196	3154	3132	3161

Walter - CNMG 120408E-NRT

Pro třetí měření byla použita vyměnitelná břitová destička Walter - CNMG 120408E-NRT.

Tab. 5.43 Naměřené zatěžující síly na řezný nástroj Walter

Naměřené pasivní síly F_p [N]				Naměřené posuvové síly F_f [N]				Naměřené řezné síly F_c [N]			
1	2	3	Ø	1	2	3	Ø	1	2	3	Ø
280	290	289	286	367	375	383	375	649	658	657	655
351	353	363	356	821	825	846	831	1402	1409	1441	1417
772	794	835	800	2246	2202	2265	2238	3484	3442	3478	3468

SAFETY - CNMG 120408-M5

Pro čtvrté měření byla použita vyměnitelná břitová destička SAFETY - CNMG 120408-M5.

Tab. 5.44 Naměřené zatěžující síly na řezný nástroj SAFETY

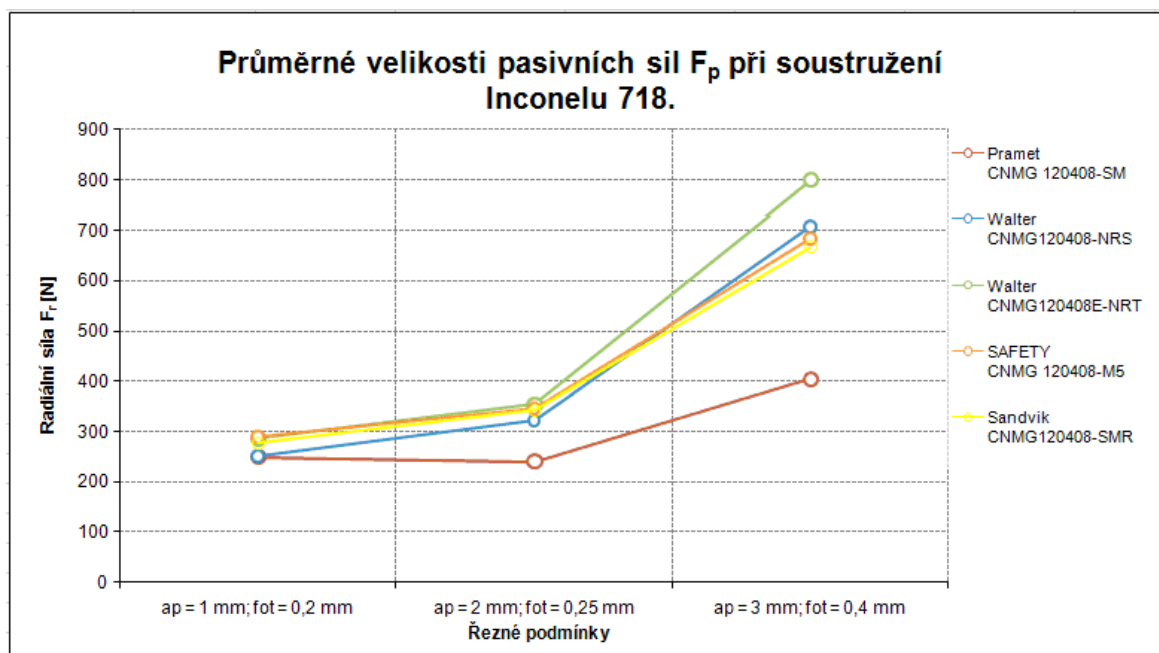
Naměřené pasivní síly F_p [N]				Naměřené posuvové síly F_f [N]				Naměřené řezné síly F_c [N]			
1	2	3	Ø	1	2	3	Ø	1	2	3	Ø
286	296	284	289	383	396	393	391	687	684	677	683
341	345	353	346	776	775	815	789	1385	1386	1417	1396
700	675	673	683	1618	1620	1662	1633	3251	3243	3309	3268

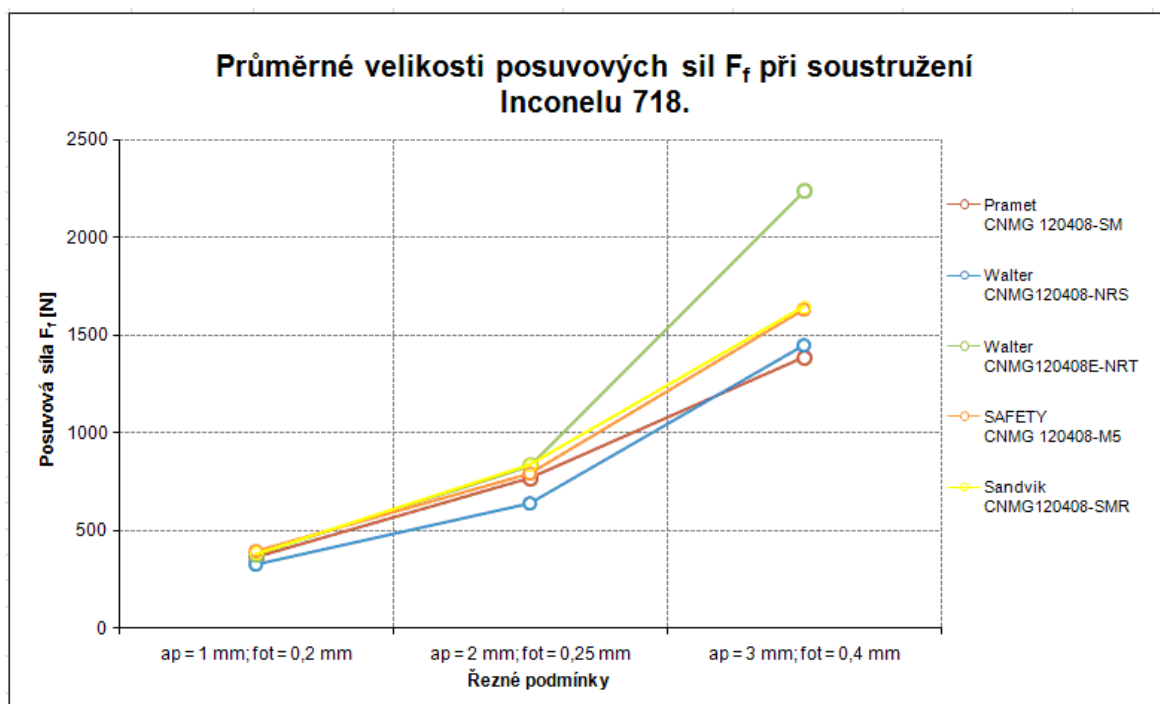
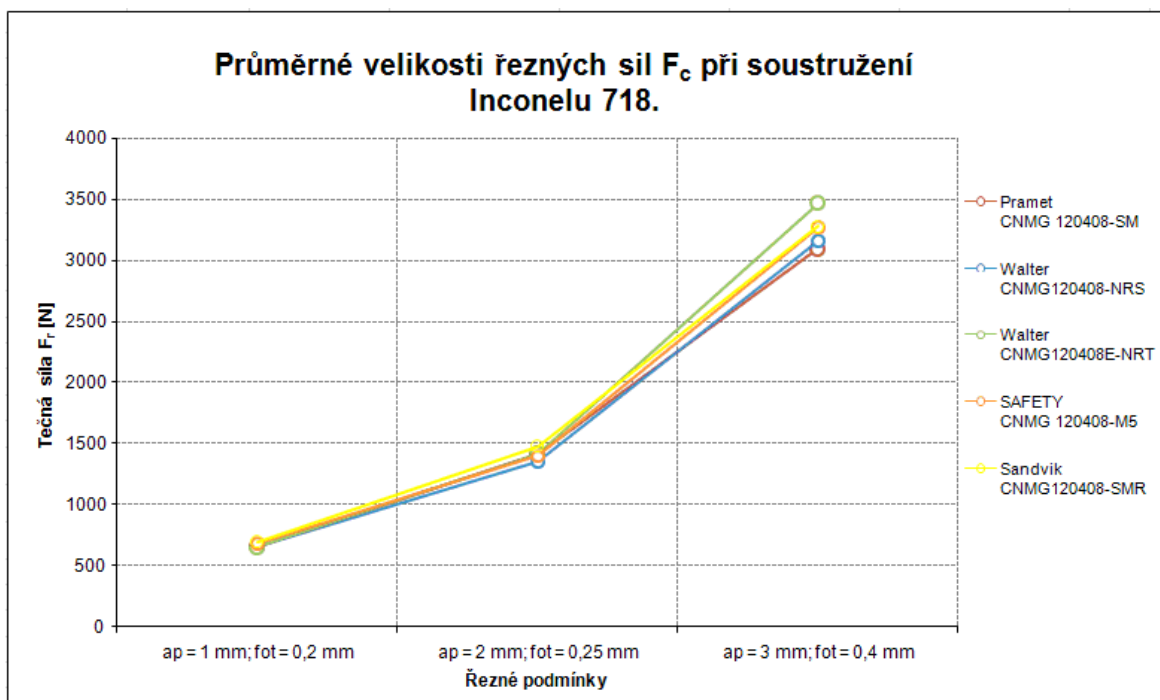
Sandvik - CNMG 120408-SMR

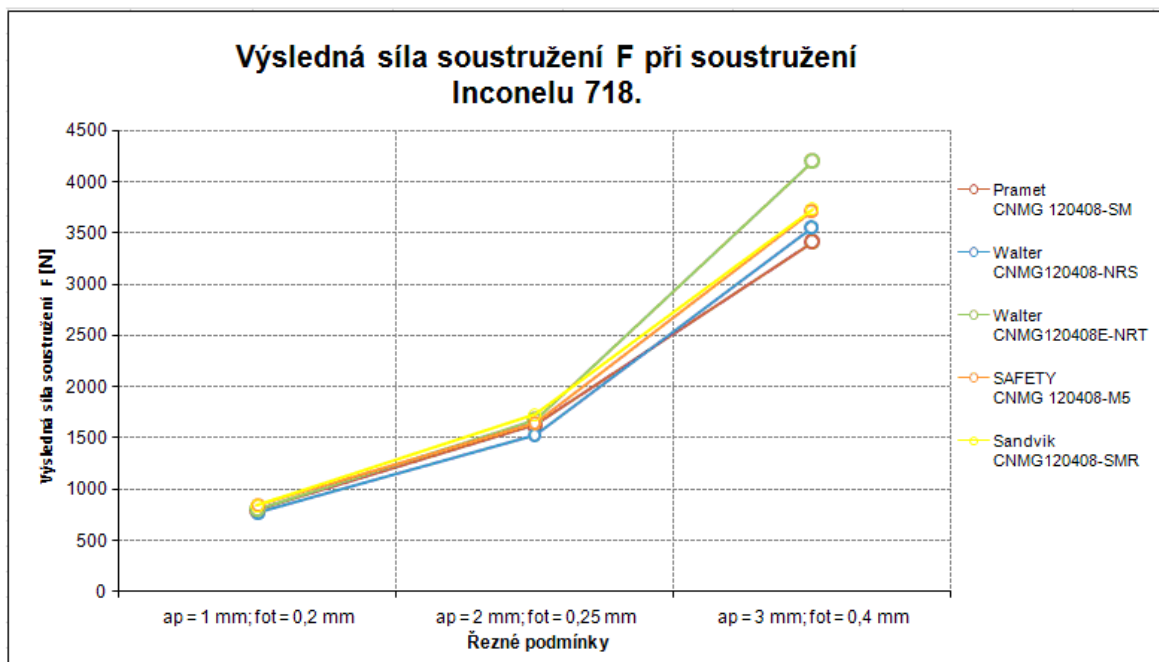
Pro páté měření byla použita vyměnitelná břitová destička Sandvik - CNMG 120408-SMR.

Tab. 5.45 Naměřené zatěžující síly na řezný nástroj Sandvik

Naměřené pasivní síly F_p [N]				Naměřené posuvové síly F_f [N]				Naměřené řezné síly F_c [N]			
1	2	3	Ø	1	2	3	Ø	1	2	3	Ø
280	281	271	277	369	380	385	378	689	691	703	694
341	336	349	342	818	823	854	832	1454	1461	1519	1478
660	669	670	666	1634	1656	1640	1643	3308	3279	3264	3284

Obr. 5.41 Průměrná velikost pasivních sil F_p

Obr. 5.42 Průměrná velikost posuvových sil F_f Obr. 5.43 Průměrná velikost řezných sil F_c



Obr. 5.44 Výsledná síla soustružení F

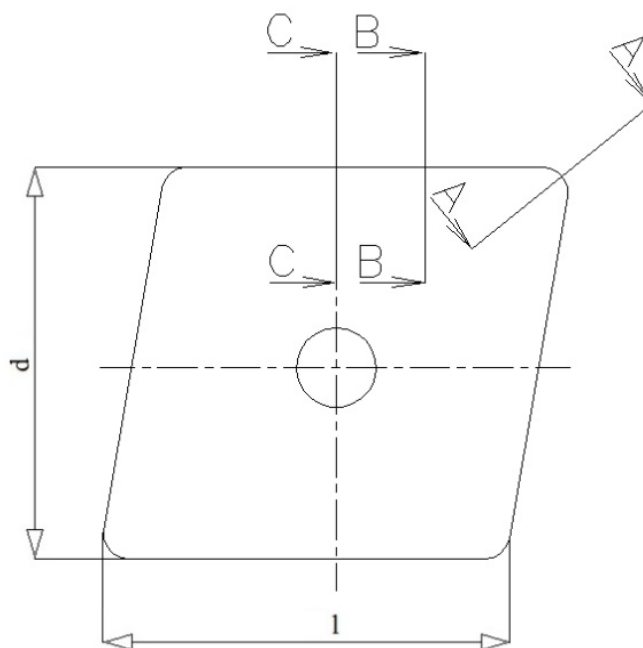
Z výsledných grafů silového zatížení nástroje při soustružení slitiny niklu Inconel 718 a procentuelních porovnáních jsou zřejmé následující závěry:

- Zvětšujícím se opotřebením vyměnitelné břitové destičky se zvyšuje řezný odpor.
- Nejmenší podíl na výsledné síle soustružení F má pasivní síla F_p , její procentuelní podíl se průměrně pohybuje kolem 6 %, po ní následuje posuvová síla F_f s 21%. Největší podíl má řezná síla F_c , její podíl na F je průměrně kolem 73%.
- Velmi malé silové zatížení bylo naměřeno u VBD Walter – NRS a Pramet a největší silové zatížení bylo naměřeno u vyměnitelné břitové destičky Walter - NRT. Rozdíl u výsledné síly soustružení F byl mezi těmito řeznými nástroji při největších řezných podmínkách ($a_p = 3 \text{ mm}$ a $f_n = 0,4 \text{ mm}$) 23 % a to je velikost 800 N.

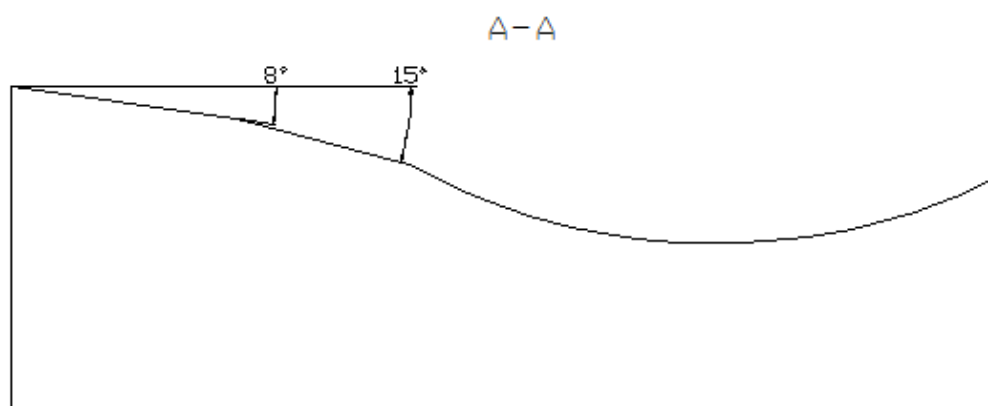
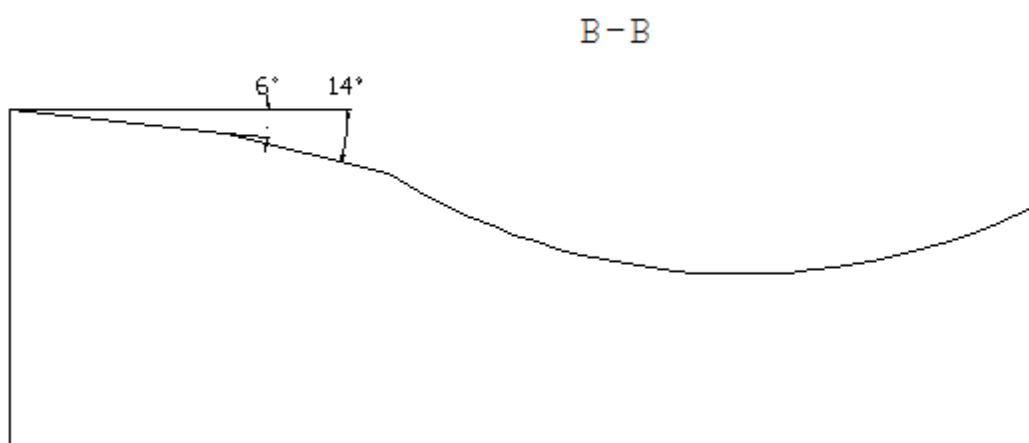
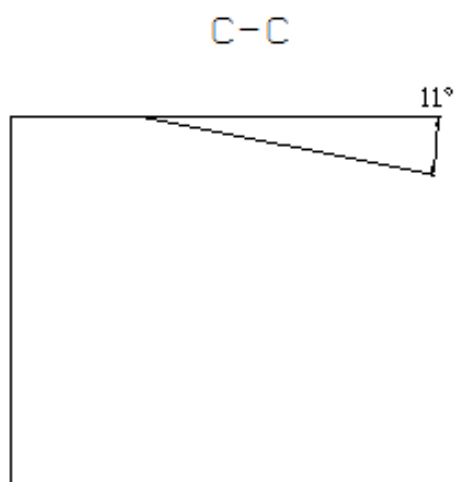
6 Návrh geometrie VBD pro skupinu ISO S

Rozmanité spektrum materiálů patřících do skupiny ISO S je obtížné pokrýt jednou univerzální geometrií. Například podnik Walter CZ, s.r.o. nabízí na obrábění superslitin dvě geometrie. Pro titanové slitiny doporučuje negativnější geometrii než na slitiny typu Inconel 718. Úkolem bylo navrhnout jednu univerzální geometrii. Při testech nevydržel díky své pozitivní geometrii Pramet prototyp SM z hlediska pevnosti. Sandvik SMR je na druhou stranu představitelem pevné negativní geometrie, která je sice velmi pevná, ale dochází zde naopak ke generování velkého množství tepla. Jeho výsledky při testech byly také podprůměrné. Můžeme tedy říct, že pro návrh je důležité najít rovnováhu mezi pozitivní geometrií a pevností bříty.

Při návrhu geometrie se vycházelo z výrobku podniku SAFETY, s.r.o., který při testech vycházel nejlépe. Utvařeč má pozitivní fazetku. Fazetka zajišťuje pevný břit a snížení kontaktu třísky s čelem (snížení přenosu tepla do nástroje). Pozitivní úhel utvařeče snižuje řezné síly. Po konzultaci s pracovníky podniku Pramet Tools, s.r.o., byla navržena následující geometrie VBD o rozměrech $l = 12,9$ mm, $d = 12,7$ mm a zaoblení špičky 0,8 mm – viz. obr. 6.1 Pro snížení kontaktu třísky s čelem nástroje, zachování nízkých řezných sil a zvýšení pevnosti nástroje byla volena fazetka pod úhly $0 - 8^\circ$ a úhly utvařeče $11^\circ - 15^\circ$. Navržený nástroj je pevný a zároveň si zachovává pozitivní charakter, který je pro obrábění superslitin velmi důležitý.



Obr. 6.1 Vyměnitelná břitová destička

*Obr. 6.2 VBD řez A-A**Obr. 6.3 VBD řez B-B**Obr. 6.4 VBD řez C-C*

7 Technicko - ekonomické zhodnocení

Při výpočtu technicko - ekonomického zhodnocení jsem vycházel ze vzorců používaných podnikem Pramet Tools, s.r.o.

$$N_{CELK} = N_S + N_N + N_V$$

Kde:

N_{CELK} = celkové náklady na obrobení 1 obrobku závislé na řezných podmínkách

N_S = náklady na strojní čas (podíl odpisu obráběcího stroje, náklady na mzdy, energii a údržbu stroje a náklady na podpůrné pracoviště)

N_V = náklady na výměnu otupeného břitu

N_N = náklady na nástroj

$$N_S = \frac{\text{sazba stroje}}{60} \cdot \text{strojní čas na obrobek} \quad [\text{Kč / ks}] \quad (6.1)$$

$$N_V = \frac{\text{sazba stroje}}{60 \cdot \text{trvanlivost}} \quad [\text{Kč / ks}] \quad (6.2)$$

$$N_N = \frac{\text{cena destičky}}{\text{počet řezných hran} \cdot \text{trvanlivost}} \quad [\text{Kč / ks}] \quad (6.3)$$

Sazba stroje = 1500 Kč / hod.

Strojní čas na obrobek = 1 min. / 1 ks

$$\text{Trvanlivost} = \frac{\text{trvanlivost}[\text{min}]}{(1 \text{ min} / \text{ks})} \quad [\text{ks}] \quad (6.4)$$

Tab. 7.1 Ceny jednotlivých VBD

Výrobce	Destička - označení	Utvařec	Cena [Kč/ks]
Pramet Tools, s.r.o.	CNMG 120408	SM	165
Walter CZ, s.r.o.	CNMG 120408	NRS	176
Walter CZ, s.r.o.	CNMG 120408E	NRT	176
SAFETY, s.r.o.	CNMG 120408	M5	173
Sandvik CZ, s.r.o.	CNMG 120408	SMR	225

7.1 Technicko - ekonomické zhodnocení pro slitinu titanu Ti₆Al₄V

Tab. 7.2 Náklady jednotlivých VBD

Destička - označení	Trvanlivost	N_N	N_V	N_S	N_{CELK}
	[ks]	[Kč/ks]	[Kč/ks]	[Kč/ks]	[Kč/ks]
Pramet CNMG 120408-SM	14	5,90	1,80	25	32,70
Walter CNMG 120408-NRS	9	9,80	2,80	25	37,60
Walter CNMG 120408E-NRT	12	7,30	2,10	25	34,40
SAFETY CNMG 120408-M5	14	6,20	1,80	25	33
Sandvik CNMG 120408-SMR	12	9,40	2,10	25	36,50

Pramet - CNMG 120408-SM

Příklad výpočtu jednotlivých nákladů pro VBD od podniku Pramet Tools, s.r.o.

Trvanlivost destičky 14 ks

$$N_N = \frac{165}{2 \cdot 14} = 5,90 \text{ Kč / ks}$$

$$N_V = \frac{1500}{60 \cdot 14} = 1,80 \text{ Kč / ks}$$

$$N_S = \frac{1500}{60} \cdot 1 = 25 \text{ Kč / ks}$$

$$N_{CELK} = 5,90 + 1,80 + 25 = 32,70 \text{ Kč / ks}$$

V tabulce, kde jsou uvedeny jednotlivé náklady VBD je jednoznačně nejlevnější destička, z celkových nákladů na obrobení jednoho obrobku, od společnosti Pramet Tools, s.r.o.. Celková cena nákladů této destičky činí 32,70 Kč/ks. Při obrobení 1000 ks obrobků ročně je cena 32 700 Kč/ks. V porovnání VBD od společnosti Walter CZ, s.r.o. ušetříme při použití vyměnitelné břitové destičky od Pramet Tools, s.r.o. 4900 Kč/ks ročně.

7.2 Technicko - ekonomické zhodnocení pro slitinu niklu Inconel 718

Tab. 7.3 Náklady jednotlivých VBD

Destička - označení	Trvanlivost	N_N	N_V	N_S	N_{CELK}
	[ks]	[Kč/ks]	[Kč/ks]	[Kč/ks]	[Kč/ks]
Pramet CNMG 120408-SM	3	27,50	8,30	25	60,80
Walter CNMG 120408-NRS	13	6,80	1,90	25	33,70
Walter CNMG 120408E-NRT	9	9,80	2,80	25	37,60
SAFETY CNMG 120408-M5	13	6,70	1,90	25	33,60
Sandvik CNMG 120408-SMR	13	8,70	1,90	25	35,60

Pramet - CNMG 120408-SM

Příklad výpočtu jednotlivých nákladů pro VBD od podniku Pramet Tools, s.r.o.

Trvanlivost destičky 3 ks

$$N_N = \frac{165}{2 \cdot 3} = 27,50 \text{ Kč / ks}$$

$$N_V = \frac{1500}{60 \cdot 3} = 8,30 \text{ Kč / ks}$$

$$N_S = \frac{1500}{60} \cdot 1 = 25 \text{ Kč / ks}$$

$$N_{CELK} = 27,50 + 8,30 + 25 = 60,80 \text{ Kč / ks}$$

V tabulce, kde jsou uvedeny jednotlivé náklady VBD je jednoznačně nejlevnější destička, z celkových nákladů na obrobení jednoho obrobku, od společnosti SAFETY, s.r.o. Celková cena nákladů této destičky činí 33,60 Kč/ks. Při obrobení 1000 ks obrobků ročně je cena 33 600 Kč/ks. V porovnání VBD od společnosti Pramet Tools, s.r.o. ušetříme při použití vyměnitelné břitové destičky od SAFETY, s.r.o. 27 200 Kč/ks ročně.

Závěr

Diplomová práce se zabývala návrhem geometrie VBD pro soustružení materiálu skupiny ISO S. Do této skupiny se řadí materiály, které jsou těžkoobrobitelné. Materiály, které byly použity v této diplomové práci: slitina titanu Ti_6Al_4V a slitina niklu Inconel 718. Při testech bylo použito celkem pět vyměnitelných břitových destiček od různých výrobců: Pramet - CNMG 120408-SM, Walter - CNMG 120408-NRS, Walter - CNMG 120408E-NRT, SAFETY - CNMG 120408-M5, Sandvik - CNMG 120408-SMR. U prováděných testů se měřila trvanlivost VBD, po ukončení tohoto měření následovalo měření silového zatížení.

Pro experiment byl zvolen soustruh SU50, kde byl použitý nepřerušovaný řez bez použití chladicí kapaliny. U měření trvanlivosti VBD bylo provedeno dvojí měření. Režná rychlost byla konstantní a měnil se pouze posuv na otáčku a odebíraný materiál za jeden přejezd. Fotky opotřebení vyměnitelných břitových destiček byly vytvořeny binokulárním stereomikroskopem Vision Engineering SX45 s připojenou digitální kamerou. Silové zatížení bylo měřeno pomocí tříslžkového dynamometru KISTLER 9257B s příslušnou měřicí soustavou.

Jednotlivé naměřené hodnoty byly zpracovány do tabulek, z kterých byly vytvořeny grafy pro porovnání jednotlivých naměřených hodnot VBD. Při soustružení slitiny titanu Ti_6Al_4V nejlépe dopadly VBD Pramet - CNMG 120408-SM a SAFETY - CNMG 120408-M5. Trvanlivost břitu u těchto vyměnitelných destiček za daných řezných podmínek byla okolo 14 minut. U těchto dvou testovaných VBD docházelo k pomalejšímu vzniku výmolu na čele. Nejhuře při těchto testech dopadla VBD Walter - CNMG 120408-NRS, kdy nastalo velmi intenzivní tvoření výmolu, které přesáhlo zvolené kritérium opotřebení. Trvanlivost této vyměnitelné břítové destičky se pohybovala kolem 9 minut. Při soustružení slitiny niklu Inconel 718 velmi dobře dopadly VBD: Walter - CNMG 120408-NRS, SAFETY - CNMG 120408-M5 a Sandvik - CNMG 120408-SMR. Trvanlivost se pohybovala kolem 13 minut. U vyměnitelných břitových destiček SAFETY - CNMG 120408-M5 a Sandvik - CNMG 120408-SMR vzniklo intenzivní opotřebení na hřbetě a u VBD Walter - CNMG 120408-NRS docházelo k lavinovitému opotřebení hřbetu na rádiu řezné hrany. Tento rozdíl opotřebení je způsoben rozdílnou kombinací základního substrátu a povlaku.

Nejhůře při testech dopadla VBD Pramet - CNMG 120408-SM, kde bylo velmi intenzivní opotřebení ve tvaru vrubu. Trvanlivost tohoto břitu se pohybovala kolem 3 minut.

U hodnocení silového zatížení VBD při operaci soustružení slitiny titanu Ti_6Al_4V a slitiny niklu Inconel 718 byly použity tři kombinace řezných podmínek, měnil se posuv na otáčku a hloubka řezu. Při měření silového zatížení bylo zjištěno, že rozdílné geometrie VBD mají vliv na jednotlivé složky výsledné řezné síly. U měření těchto dvou slitin však rozdíly nejsou natolik výrazné, jak se očekávalo. Odchylka se u tohoto měření silového zatížení pohybovala do 1,12%. Při velmi malých řezných podmínkách $a_p = 1$ mm a $f_n = 0,2$ mm jsou odchylky v silovém zatížení nástroje minimální. U slitiny niklu Inconel 718: F_p do 15%, F_f do 11% a F_c do 5% a F do 6%. U slitiny titanu Ti_6Al_4V : F_p do 35%, F_f do 41% a F_c do 10% a F do 19%. Hodnoty silového zatížení u Ti_6Al_4V jsou zřetelně ovlivněny hodnotami VBD Walter - NRT, rozdíly mezi ostatními vyměnitelnými břitovými destičkami nejsou tak dominantní. Zřetelnější rozdíly v silovém zatížení obou těžkoobrobitelných slitin jsou zřetelné až při nejvyšších řezných podmínkách $a_p = 3$ mm a $f_n = 0,4$ mm. Při těchto řezných podmínkách byly odchylky v silovém zatížení následující: F_p do 98%, F_f do 62% a F_c do 12% a F do 23%.

Při návrhu geometrie VBD pro soustružení superslitin se vycházelo z řezného nástroje od společnosti SAFETY, s.r.o., který dopadl při testech nejlépe. Po konzultaci s pracovníky společnosti Pramet Tools, s.r.o. byla navrhována geometrie VBD.

V závěru diplomové práce bylo provedeno technicko - ekonomické zhodnocení jednotlivých VBD, kde při obrábění slitiny titanu Ti_6Al_4V , co se týče celkových nákladů, nejlépe dopadla vyměnitelná břitová destička od společnosti Pramet Tools, s.r.o.. Roční úspora zde byla 4900 Kč/ks. Při obrábění slitiny niklu Inconel 718 nejlépe dopadla VBD od podniku SAFETY, s.r.o., roční úspora činila 27 200 Kč/ks.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce, panu doc. Ing. Vladimíru Vrbovi, CSc. a panu Ing. Tomáši Zlámalovi z Katedry obrábění a montáže VŠB - TU Ostrava, za jeho poskytnuté rady při psaní této práce. Potom bych chtěl poděkovat pracovníkům Pramet Tools, s.r.o. na pracovišti zkušebna za to, že mi pomohli při vypracování experimentální práce. Další poděkování patří panu Ing. Jiřímu Jeníkovi za poskytnutí materiálů a odbornou pomoc při zpracování této diplomové práce.

Bc. Jan Schiffner, DiS

Seznam použité literatury

- [1] DURAND-CHARRE, M.: *The Microstructure of Superalloys*. Gordon & Breach Science Publisher, Amsterdam, 1997. 121 s. ISBN-10 9056990977.
- [2] BRYCHTA, Josef. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2007, 1 CD-R. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [3] SECO TOOLS CZ, s. r. o., *Obrábění nerezových ocelí: Příručka pro technology*. 2012. vyd.
- [4] Oceli a slitiny. *Vysokopevné a vysokolegované oceli a slitiny*. [online]. [cit. 2014-03-19]. Dostupné na WWW: http://umi.fs.cvut.cz/files/01_pm_vyskopevne_a_vysokolegovane_oceli_a_slitiny_ni_a_c_o.pdf.
- [5] DARECKÝ, Janusz. *Superzliatiny niklu a ich obrábanie*. Žilina: Žilinská univerzita / Monografie, 2001. 107 s. ISBN 80-7100-785-4.
- [6] Slovenská technická univerzita Bratislava. *Katedra energetiky*. [online]. [cit. 2014-03-19]. Dostupné na WWW: http://www.sjf.stuba.sk/sk/ustavy/ustav-tepelnej-energetiky.html?page_id=3043.
- [7] DE VOS, Patrick. Příručka pro technology - Obrobitelnost. *MM Průmyslové spektrum*, 2011 / 12, str. 58. Kód článku: 111218.
- [8] Superslitiny. *Superslitiny*. [online]. [cit. 2014-03-19]. Dostupné na WWW: <http://www.sps-ub.cz/ccv/projekty/vzdelavanipedagogu/dokumenty/skripta/kurz06.pdf>.
- [9] Obrobitelnost materiálů. *Obrobitelnost materiálů*. [online]. [cit. 2014-03-19]. Dostupné na WWW: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_06.pdf.
- [10] Příručka pro technology. *Obrobitelnost*. [online]. [cit. 2014-03-19]. Dostupné na WWW: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-obrobitelnost.html>.
- [11] NESLUŠAN, Miroslav, CZÁN, Andrej. *Obrábanie titanových a niklových zliatin*. s 193 Žilina: Žilinská univerzita v Žilíně, 2002, ISBN 80-7100-785-4.

- [12] CAMPBELL, F.C. Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials 1.vyd. Elsevier Ltd., 2006. 617 p. ISBN 1-85-617-7495-6.
- [13] Obrábění superslitin. *Obrábění titanu*. [online]. [cit. 2014-03-20]. Dostupné na WWW: <http://technickytydenik.cz/prekvapeni/profiwh.com/rubriky/archiv/obrabeni-titanu-supersliti-n-a-nerezavejicich-oceli-s-frezou-mastermill-2520_21583.html>.
- [14] Soustružení. *Soustružení skupiny ISO S*. [online]. [cit. 2014-03-20]. Dostupné na WWW: <http://www.walter-tools.com/cs-cz/tools/standard_products/turning/overview/iso_turning/geometries_super_alloy/pages/default.aspx>.
- [15] MMspektrum. *Obrábění těžkoobrobitelných materiálů*. [online]. [cit. 2014-03-20]. Dostupné na WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-tezkoobrobitelnych-materialu>>.
- [16] Sandvik Coromant. *Sandvik Coromant*. [online]. [cit. 2014-03-20]. Dostupné na WWW: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/technical_guide/milling/grade_information/pages/default.aspx>.
- [17] FOREJT, M., HUMÁR, A., PÍŠKA, M., JANÍČEK, L. *Experimentální metody: Syllabus*, VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství, 2003. 83 s.
- [18] JURKO, J.: *Opotrebenie rezných nástrojov*, Prešov, 2005, ISBN 80-8073-255-8.
- [19] Pramet Tools, s.r.o., Šumperk: *Teorie obrábění – Pokročilý*. 2008. 110s.
- [20] Měření opotřebení nástrojů. *Měření opotřebení nástrojů*. [online]. [cit. 2014-03-20]. Dostupné na WWW: <http://home1.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_05.pdf>.
- [21] Soustruh SU 50. *Soustruh SU 50*. [online]. [cit. 2014-03-24]. Dostupné na WWW: <http://stroje.hyperinzerce.cz/kovoobrabeci-soustruhy/inzerat/2963264-soustruh-su-50-a-1000-po-go-nabidka-olomoucky-kraj/#.UtpZV_uLpdi>.
- [22] Slitiny titanu. *Ti₆Al₄V*. [online]. [cit. 2014-03-24]. Dostupné na WWW: <<http://cartech.ides.com/datasheet.aspx?i=101&E=269&FMT=PRINT>>.

- [23] Nikl a titan. *Slitiny niklu a titanu*. [online]. [cit. 2014-03-24]. Dostupné na WWW: <http://www.ateam.zcu.cz/Nikl_titan.pdf>.
- [24] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-32.
- [25] Heat treatment and fine-blankin Inconel 718. *RMZ - Materials and Geoenvironment*. [online]. [cit. 2014-03-25]. Dostupné na WWW: <http://www.rmz-mg.com/letniki/rmz55/RMZ55_0163-0172.pdf>.
- [26] Inconel 718. *Inconel 718*. [online]. [cit. 2014-03-25]. Dostupné na WWW: <<http://japanese.alibaba.com/product-tp-img/-astm-b637-inconel-718-136749232.html>>.
- [27] Automobil industry. *Automobil industry*. [online]. [cit. 2014-03-25]. Dostupné na WWW: <http://www.automobilindustry.cz/images/kovoinzert/clanky/Novinky%20Korloy_22.pdf>.
- [28] Sandvik Coromant. *Sandvik Chromant*. [online]. [cit. 2014-03-25]. Dostupné na WWW: <http://www.misan.cz/download/20090421-sandvik/igx200_4st.pdf>.
- [29] Iscar. *Iscar*. [online]. [cit. 2014-03-25]. Dostupné na WWW: <<http://www.iscar.cz/Section.asp/CountryID/6/SectionID/1928/SectionFatherID/1924>>.
- [30] New bibus. In: *New bonus*. [online]. [cit. 2014-03-25]. Dostupné na WWW: <http://new.bibus.cz/pdf/Special_Metals/Nikl/Niklove_slitiny.pdf>.
- [31] Pramet Tools, s.r.o., Šumperk: *Soustružení 2012*. 2012. 342s.
- [32] Pramet Tools, s.r.o. *Pramet Tools, s.r.o. katalog*. [online]. [cit. 2014-03-25]. Dostupné na WWW: <<http://www.bemet.cz/galerie/file/Katalogy/Pramet/NOVINKY2011v1.pdf>>.
- [33] Walter CZ, s.r.o. *Walter katalog*. [online]. [cit. 2014-03-25]. Dostupné na WWW: <<http://www.waltertools.blaetterkatalog.de/gc2012/cz/>>.
- [34] SAFETY, s.r.o. *SAFETY katalog*. [online]. [cit. 2014-03-25]. Dostupné na WWW: <<http://pdf.directindustry.com/pdf/safety/general-catalog/87793-315585-29.html>>.

[35] Sandvik CZ, s.r.o. *Sandvik katalog*. [online]. [cit. 2014-03-25]. Dostupné na WWW:

<http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CDYQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.sandvik.coromant.com%2Fsitecollectiondocuments%2Fdownloads%2Fglobal%2Fcatalogues%2Fcs-cz%2Fturning%2Fturn_a.pdf&ei=lmjuUtXGEY2BhAf4mYDIDQ&usg=AFQjCNFuuIuQT-VPn00Wi_N6F2NziEGQdw&sig2=IwXx6f4Ey8J0q6_IUhNl0A>.

[36] Dynamometr KISTLER. *Dynamometr KISTLER 9257B*. [online]. [cit. 2014-03-25]. Dostupné na WWW:

<https://www.email.cz/download/i/vmc8rkA_twIMofHAd5H70OP-G8w_lxnsy8-QNOHc60iiRKOakSd1wU_i0STb7l0wVvrpPMI/9257A%20or%20B.pdf>.